

Phys. g.

533

utb

Phys. g. 533 utb

Zwenger

LEITFADEN ZUM UNTERRICHTE

IN DER

PHYSIK.

NACH DER SCHULORDNUNG FÜR DIE HUMANISTISCHEN GYMNASIEN BAYERNS

BEARBEITET

VON

DR. MAX ZWERGER

KGL. GYMNASIALPROFESSOR.

MIT 112 IN DEN TEXT GEDRUCKTEN FIGUREN.



MÜNCHEN

J. LINDAUERSCHE BUCHHANDLUNG (SCHÖPPING)

1898.

ZWERGER,
LEITFADEN DER PHYSIK.



LEITFADEN ZUM UNTERRICHTE

IN DER

PHYSIK.

NACH DER SCHULORDNUNG FÜR DIE HUMANISTISCHEN GYMNASIEN BAYERNS

BEARBEITET

VON

DR. MAX ZWERGER

KGL. GYMNASIALPROFESSOR.

MIT 112 IN DEN TEXT GEDRUCKTEN FIGUREN.



MÜNCHEN

J. LINDAUERSCHE BUCHHANDLUNG (SCHÖPPING)

1898.

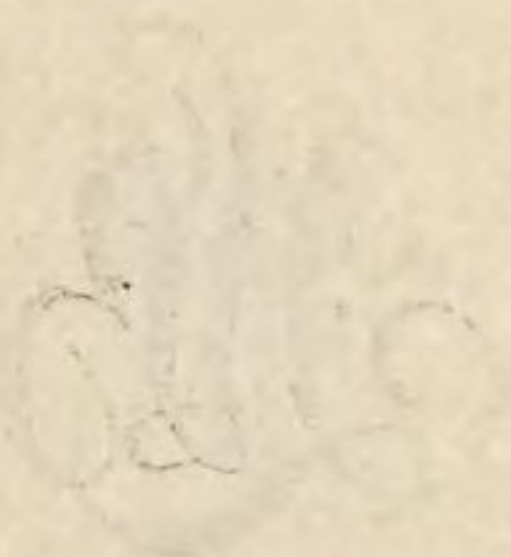
LEITFADEN ZUM UNTERRICHT

PHYSIK



DR. MAX ZWISGER

MIT EINER VON DR. MAX ZWISGER VERFASSTEN KARTEN



MÜNCHEN

LEHRBÜCHER DER PHYSIK UND MATHEMATIK

Vorwort.

Der Lehrplan, welchen die Allerhöchste Verordnung vom 23. Juni 1891 für den Unterricht in der Physik an den humanistischen Gymnasien Bayerns aufstellt, weicht nach Inhalt, Umfang und Verteilung des Stoffes von dem nichtbayerischer Anstalten so sehr ab, dass keines der in anderen Ländern gebräuchlichen Lehrbücher der Physik unseren Zwecken vollkommen genügt. Dieser Umstand sowie der, dass sich der Unterzeichnete, seit Einführung dieses Lehrgegenstandes mit dem Unterrichte in demselben betraut, über Ziele und Methoden desselben Erfahrungen sammeln konnte, veranlassten ihn, den vorliegenden Leitfaden zu veröffentlichen.

Nach der Anschauung des Verfassers soll der Schüler vom ersten Augenblicke an fort und fort darüber belehrt werden, dass der Ausgangspunkt jeglicher physikalischen Forschung die Beobachtung ist, wie sie die Natur, sei es mit, sei es ohne unser Zuthun, darbietet. Aus einer Reihe von Beobachtungen, von welchen allerdings in der Schule stets nur eine beschränkte Anzahl wird ausgeführt werden können, sind Gesetze abzuleiten und dann aus diesen Schlussfolgerungen zu ziehen.

Diese Methode hat vor der älteren, welche die Gesetze an die Spitze stellte und hinterher einen Beweis für die Richtigkeit derselben lieferte, vor allem den Vorzug, dass sie dem Schüler das Studium der Physik erleichtert; sie ist aber auch die naturgemässe, weil ja physikalische Gesetze in der That auf dem angegebenen Wege gefunden werden; sie genügt endlich aufs beste der Forderung, welche an den Unterricht in der Physik wie an den in jedem anderen Lehrgegenstand gestellt wird, dem

Schüler nicht blos Kenntnisse beizubringen, sondern ihn auch zum richtigen, logischen Denken anzuleiten.

Bei der Auswahl des Lehrstoffes, welche innerhalb der von der Schulordnung gesteckten Grenzen möglich ist, liess sich der Verfasser von dem Gedanken leiten, dass sich der Schüler nicht nur die Grundgesetze der Physik aneignen, sondern dass er auch lernen soll, physikalische Vorgänge in der Natur sowie die gewaltigen Errungenschaften der modernen physikalischen Technik wenigstens in ihren Grundzügen zu verstehen.

In der Form der Darstellung bestrebte sich der Verfasser möglicher Kürze, soweit diese ohne Gefahr für die Klarheit des Vortrages zulässig war. Für den Ausdruck eines auf dem oben angegebenen, induktiven Wege gefundenen Gesetzes sowie für die nächstliegenden Deduktionen aus einem solchen ist bisweilen die sich durch Kürze und Übersichtlichkeit auszeichnende mathematische Darstellungsweise gewählt; weitergehende mathematische Entwicklungen oder Anwendungen der Mathematik auf Physik enthält aber der vorliegende Leitfaden nicht; denn diese gehören nach der Ansicht des Verfassers in den mathematischen, nicht in den physikalischen Lehrstoff.

Figuren sind beigegeben, theils um das Verständnis der Erläuterungen zu erleichtern, theils um die Einrichtung wichtigerer Apparate schematisch darzustellen; eingehendere Beschreibung der letzteren sowie volle Zeichnungen derselben fehlen, weil der Schüler Instrumente, deren Einrichtung und Zweck er verstehen soll, doch in wirklicher Ausführung vor sich sehen muss.

Beobachtungsergebnisse der wichtigsten physikalischen Grössen sind je an geeigneter Stelle im Texte angegeben.

Für die Ausstattung des Buches hat die Verlagshandlung sicherlich alles gethan, was man von einem Lehrbuche aus ästhetischen und hygienischen Gründen verlangen kann.

Würzburg, im Januar 1898.

Dr. M. Zwerger.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

	Seite
A. Vorbegriffe	1
B. Allgemeine Eigenschaften der Naturkörper	2
C. Unterschied zwischen Physik und Chemie	7

Erster Abschnitt. Von den Kräften.

A. Von den Kräften im allgemeinen	9
B. Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften	10
C. Vom Schwerpunkte der Körper	17

Zweiter Abschnitt. Vom Gleichgewichte der Körper.

A. Vom Gleichgewichte fester Körper	19
B. Vom Gleichgewichte der Flüssigkeiten	28
C. Vom Gleichgewichte gasförmiger Körper	40

Dritter Abschnitt. Vom Schalle.

A. Vom Schalle im allgemeinen	54
B. Von den Tönen	59

Vierter Abschnitt. Von der Wärme.

A. Ausdehnung der Körper. Änderung ihres Aggregatzustandes durch die Wärme	69
B. Wärmemessung	82
C. Ausbreitung der Wärme. Wärmequellen. Wärmetheorie	84
D. Anhang. Grundzüge der Witterungskunde	86

Fünfter Abschnitt. Von der Bewegung der Körper.

A. Bewegung infolge der Wirkung einer Kraft oder zweier gleich gerichteten Kräfte	90
B. Bewegung infolge der Wirkung zweier Kräfte von ungleicher Richtung	96

Sechster Abschnitt. Vom Lichte.

	Seite
A. Ausbreitung des Lichtes	106
B. Zurückwerfung des Lichtes	109
C. Brechung des Lichtes	114
D. Farbenzerstreuung des Lichtes	122
E. Das Auge und die optischen Instrumente	125

Siebenter Abschnitt. Vom Magnetismus und von der Elektrizität.

A. Magnetismus	133
B. Reibungselektrizität	137
C. Berührungselektrizität	147
D. Thermoelektrizität	162
E. Technische Verwendung elektrischer Ströme. Stromerzeugungs- maschinen	163

Einleitung.

A. Vorbegriffe.

1. Natur. Naturwissenschaften. Physik.

Natur ist der Inbegriff alles dessen, was einen Raum einnimmt und mit Stoff oder Materie erfüllt ist, Naturkörper jeder allseitig begrenzte, mit Stoff erfüllte Teil des unendlichen Raumes. Dem Menschen ist die Natur durch seine Sinne wahrnehmbar.

Diejenigen Wissenschaften, welche sich mit den Eigenschaften der Naturkörper beschäftigen, heissen Naturwissenschaften; zu ihnen gehört die Naturbeschreibung, welche die bleibenden Eigenschaften der Naturkörper untersucht und diese auf Grund derselben ordnet (Zoologie, Botanik, Mineralogie), und die Naturlehre, welche die durch bestimmte Ursachen an den Naturkörpern hervorgerufenen Veränderungen feststellt. Die Physik, ein Teil der letzteren, beschäftigt sich mit solchen Veränderungen der Naturkörper, bei welchen der Stoff, aus dem sie bestehen, seinem Wesen nach ungeändert bleibt.

2. Forschungsmethode. Naturgesetz. Hypothese.

Die Naturwissenschaften sind ihrem Wesen nach Erfahrungswissenschaften; daher lässt sich auch die Physik nur durch Beobachtung studieren. Gelegenheit zu letzterer bieten teils die in der Natur vor sich gehenden Zustandsänderungen der Körper, welche wir Naturerscheinungen nennen, teils Vorgänge, welche von uns absichtlich hervorgerufen und Versuche oder Experimente genannt werden.

Finden wir, dass unter wiederholter Voraussetzung der nämlichen Bedingungen sich stets die nämliche Erscheinung ergibt, so sagen wir, es liege ihr ein Naturgesetz zu Grunde. Den letzten Grund einer jeden Naturerscheinung nennen wir eine Naturkraft. Über das Wesen der Naturkräfte sind wir allerdings im Unklaren und deshalb gezwungen, bezüglich derselben eine Annahme zu machen. Eine solche Annahme, welche man Hypothese nennt, ist um so besser, je einfacher sie ist und je mehr Erscheinungen sich mit Hilfe derselben erklären lassen; sie muss verworfen werden, sobald ihr eine bekannte Erscheinung widerspricht.

So zeigt beispielsweise die Beobachtung, dass jeder Körper zu Boden fällt, wenn er nicht irgendwie daran gehindert wird; es ist also ein Naturgesetz: Alle Körper auf der Erde haben das Bestreben, lotrecht abwärts, d. h. in der Richtung zum Erdmittelpunkte zu fallen. Den Grund dieser Erscheinung nennen wir die Schwerkraft der Erde, indem wir die Annahme machen, die Erde habe die Fähigkeit, Körper anzuziehen.

B. Allgemeine Eigenschaften der Naturkörper.

3. Ausdehnung.

Jeder natürliche Körper ist erfahrungsgemäss nach Länge, Breite und Höhe ausgedehnt. Diese Ausdehnungen, sowie die Oberfläche und der Inhalt eines Körpers können gemessen werden.

Als Masseinheit für Längen nimmt man das Meter, den zehnmillionsten Teil des Meridianquadranten von Paris, mit seinen Ober- und Unterabteilungen, für Flächen das Quadratcentimeter oder Quadratdecimeter, für Körper das Kubikcentimeter oder Kubikdecimeter (Liter).

4. Undurchdringlichkeit.

Versuche. Bringt man in ein bis oben mit Wasser gefülltes Gefäss irgend einen anderen Körper, so fliesst das Wasser über; eine sogenannte leere Flasche lässt sich mittelst eines am Halse dicht aufsitzenden Trichters mit einer Flüssigkeit nicht füllen; die in der Flasche befindliche Luft hindert die Füllung. Diese und ähnliche Versuche beweisen, dass da, wo ein natürlicher Körper ist, nicht gleichzeitig noch ein zweiter sein kann; man sagt deshalb:

Natürliche Körper sind undurchdringlich.

Aus der Undurchdringlichkeit der natürlichen Körper folgt, dass jeder von ihnen mit irgend einem Stoffe erfüllt sein muss.

5. Teilbarkeit.

Jeder Körper lässt sich durch Schlagen, Stossen u. s. w. in Teile zerlegen; diese Teile sind wiederum teilbar u. s. f.

Die kleinsten denkbaren Teilchen eines Körpers, welche mit dem ganzen in allen wesentlichen Eigenschaften übereinstimmen, nennt man Molekel.

6. Porosität.

Kein Körper ist mit dem Stoffe, aus welchem er vorwiegend besteht, vollständig angefüllt; es bleiben zwischen seinen Teilchen stets Räume, die mit einem anderen Stoffe erfüllt sind; man nennt sie Poren.

Beispiele: Bimsstein, Kork, aber auch Sandstein, Eichenholz u. s. w.

7. Zusammendrückbarkeit und Ausdehnbarkeit.

Die Körper lassen sich zusammendrücken und ausdehnen, das heisst dieselbe Stoffmenge kann einen kleineren oder grösseren Raum einnehmen.

Wir erklären uns diese Thatsache durch die Annahme, dass die Molekel eines Körpers einander genähert oder von einander entfernt werden können.

8. Beweglichkeit. Trägheit.

*Jeder Körper kann veranlasst werden, seine Lage im Ver-
gleiche zu anderen Körpern zu ändern, d. h. sich zu bewegen.*

Andrerseits setzt jeder Körper, mag er sich im Zustande der Ruhe oder der Bewegung befinden, der Änderung dieses Zustandes einen Widerstand entgegen, welchen man seine natürliche Trägheit nennt.

Der Widerstand eines Körpers gegen eine Zustandsänderung ist bei gleicher Ursache der letzteren erfahrungsgemäss um so grösser, je grösser seine Masse, d. h. die Stoffmenge ist, die er enthält. Die Trägheit eines Körpers ist also unter sonst gleichen Umständen ein Mass für seine Masse.

9. Gewicht.

Jeder Körper übt auf einen anderen, auf welchem er liegt oder an dem er aufgehängt ist, einen Druck oder Zug aus; dieser wird

das Gewicht des Körpers genannt und ist eine Folge der auf denselben wirkenden Schwerkraft der Erde.

Durch Versuche lässt sich nun nachweisen, dass am gleichen Orte der Erdoberfläche alle Körper, von welchem Gewichte und aus welchem Stoffe sie auch sein mögen, im luftleeren Raume in gleichen Zeiten gleiche Strecke durchfallen; das ist nur möglich, wenn sich die Wirkungen, welche die Schwerkraft auf verschiedene Körper ausübt, zu einander ebenso verhalten wie die Widerstände dieser Körper gegen eine Zustandsänderung; der Wirkung der Schwerkraft ist aber das Gewicht eines Körpers, dem Widerstande desselben seine Masse proportional.

Die Gewichte zweier Körper verhalten sich also am gleichen Orte ebenso zu einander wie ihre Massen. Körper, welche am gleichen Orte gleiches Gewicht haben, haben auch gleiche Masse.

Das Gewicht desselben Körpers nimmt aber zu (bezw. ab), wenn er von einem Orte an einen anderen gebracht wird, an welchem die Schwerkraft der Erde stärker (schwächer) wirkt als an jenem.

10. Spezifisches Gewicht. Dichte.

Gleiche Volumina verschiedener Körper haben ungleiches Gewicht, also auch ungleiche Masse. Die (unbenannte) Zahl, welche angibt, wievielmals mehr Gewicht ein Körper hat als die Wassermenge vom gleichen Rauminhalte, heisst sein spezifisches Gewicht; die (unbenannte) Zahl, welche angibt, wievielmals mehr Masse ein Körper hat als die ihm inhaltsgleiche Wassermenge, nennt man seine Dichte.

Spezifisches Gewicht und Dichte haben für denselben Körper stets denselben Zahlenwert, weil der Quotient der Gewichte zweier Körper (am gleichen Orte) dem ihrer Massen gleich ist; dieser Zahlenwert ist von dem Rauminhalte des Körpers unabhängig, also für alle Körper aus demselben Stoffe der gleiche; man sagt deshalb, jeder Stoff habe ein bestimmtes spezifisches Gewicht bezw. eine bestimmte Dichte.

Das (absolute) Gewicht eines Körpers lässt sich mit Hilfe einer Wage (13. 29) bestimmen. Gewichtseinheit ist das Gramm, das Gewicht, welches ein Kubikcentimeter Wasser von grösster Dichte in Paris hat. Die Dichte des Wassers ändert sich, wie die Beobachtung zeigt, mit seiner Temperatur; am grössten ist sie bei 4,2° Celsius.

Zusatz. Wiegt ein Körper g Gramm, die Wassermenge von gleichem Inhalte v Gramm, so lässt sich, da v Gramm Wasser v Kubikcentimeter Raum einnehmen, der Quotient $g:v=s$, das spezifische Gewicht des Körpers, auch definieren als das in Gramm gemessene Gewicht seiner Volumeneinheit.

Umgekehrt hat ein Körper von v Kubikcentimeter Inhalt und dem spezifischen Gewichte s das (absolute) Gewicht

$$g = v \cdot s \text{ Gramm.}$$

11. Aggregatzustände.

Es gibt feste, flüssige und gasförmige Körper; ein Körper heisst fest, wenn er bestimmten Inhalt und bestimmte Form hat, flüssig, wenn er zwar bestimmten Inhalt aber keine bestimmte Form hat, gasförmig, wenn er weder bestimmten Inhalt noch bestimmte Form hat.

Um die Verschiedenheit der Aggregatzustände zu erklären, denkt man sich die Molekeln eines Körpers mit Kräften ausgestattet, die auf sehr kleine Entfernungen hin zwischen denselben teils anziehend, teils abstossend wirken (Molekularkräfte). Ist die Wirkungsfähigkeit der anziehenden Kräfte grösser als die der abstossenden, so dass der Körper Kräften, welche von aussen auf denselben wirken, wie etwa der Schwerkraft, Widerstand leisten kann, so ist er fest; ist die Wirkung der anziehenden Kräfte nur um wenig grösser, als die der abstossenden, muss also der Körper Kräften, die von aussen wirken, Folge leisten, so ist er flüssig; bei den gasförmigen Körpern haben wir uns endlich vorzustellen, dass ihre Molekeln sich gegenseitig abstossen.

12. Kohäsion. Adhäsion.

Beobachtungen. Um einen festen Körper zu zerbrechen, muss man Kraft anwenden; Wasser- oder Quecksilbertröpfchen, welche sich berühren, fliessen zusammen. Taucht man jedoch einen Glasstab in Wasser, Mehl u. dgl. und zieht ihn wieder heraus, so bleiben Wassertröpfchen, Mehlstäubchen an ihm haften; bei dem Versuche, eine ebene Glasplatte von einer Wasserfläche, welche sie berührt, abzuheben, verspürt die Hand deutlich einen Widerstand; von Quecksilber dagegen bleibt Glas unberührt.

Die Erscheinung, dass ein Körper einer Trennung seiner Teilchen Widerstand leistet, nennt man *Kohäsion*, dagegen die Erscheinung, dass Teilchen eines Körpers an einem anderen haften bleiben, *Adhäsion*.

Kohäsion und Adhäsion lassen sich ebenfalls durch die Annahme erklären, dass zwischen den Molekeln sowohl jedes einzelnen Körpers als auch zwischen denen verschiedener Körper Kräfte wirken. Sind letztere grösser als erstere, so haften die Körper aneinander; ein flüssiger Körper wird in diesem Falle von einem festen aufgesaugt (Kapillarität), ein fester in einem flüssigen aufgelöst (Lösungen), ein gasförmiger von einem festen oder flüssigen verschluckt (Absorption); auch Leimen, Kitten, Löten u. s. w. beruhen auf Adhäsion.

13. Festigkeit. Härte. Elastizität. Dehnbarkeit.

Festigkeit eines Körpers ist der äusserste Widerstand, welchen er einer Trennung seiner Teilchen entgegensetzt.

Unter Härte versteht man den Widerstand, welchen ein Körper dem Eindringen eines fremden Körpers entgegensetzt. (Härtegrade, Weichheit).

Hat ein Körper die Fähigkeit, nach Aufhören einer von aussen wirkenden Kraft seine ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen, so heisst er elastisch und die Kraft, welche die Rückkehr in den ursprünglichen Zustand bewirkt, nennt man Elastizität.

V e r s u c h. Hängt man an einen elastischen Körper (Spiralfeder, Gummischnur) ein Gewicht, so wird er um eine gewisse Strecke verlängert, durch das doppelte Gewicht um die doppelte Länge u. s. f.

Gesetz. *Die Verlängerung, welche ein elastischer Körper durch ein angehängtes Gewicht erfährt, ist also diesem Gewichte proportional.* (Federwage.)

Doch hat dieses Gesetz insofern eine Grenze, als der Körper von einer bestimmten Grösse des Gewichtes an nach Entfernung desselben nicht mehr zu seiner ursprünglichen Länge zurückkehrt, also seine Elastizität, wenigstens teilweise, verliert. (Elastizitätsgrenze.)

Ein Körper heisst dehnbar oder biegsam, wenn die durch eine Kraft bewirkte Gestaltsänderung eine bleibende ist, spröde, wenn er infolge einer von aussen wirkenden Kraft reisst oder bricht.

Bemerkung. Festigkeit, Härte, Elastizität, Dehnbarkeit und Sprödigkeit sind Folgen der Kohäsionskraft eines Körpers, hängen aber vielfach auch von seiner Gestalt ab. (Drahtspirale.)

C. Unterschied zwischen Physik und Chemie.

14. Erklärungen. Versuche.

Physik und Chemie beschäftigen sich beide mit den Veränderungen, welche die Naturkörper unter gegebenen Bedingungen erleiden; aber während die Physik jede stoffliche Änderung aus dem Kreise ihrer Betrachtungen ausschliesst, sucht die Chemie gerade diese stofflichen Änderungen kennen zu lernen.

Beispiele

a) für physikalische

Schwefel ist unter gewöhnlichen Umständen ein fester, geruchloser, in Wasser unlöslicher Körper von gelber Farbe; sein spezifisches Gewicht beträgt 2,07. Erwärmt schmilzt er bei 112° zu einer dünnen, honiggelben Flüssigkeit, wird bei weiterem Erhitzen dickflüssig und rotbraun und fängt bei 424° zu sieden und zu verdampfen an.

Quecksilber und Schwefel lassen sich in beliebigen Gewichtsverhältnissen zu einem gelblich-grauen Pulver zusammenreiben. In dem Gemenge lassen sich die Schwefelteilchen von den Quecksilbertröpfchen unterscheiden. (Physikalisches Gemenge.)

Ätzkali, eine Verbindung von Kali und Sauerstoff, ist im Wasser löslich und bildet dann sogenannte Kalilauge, die sich mit Wasser beliebig verdünnen lässt. (Physikalische Lösung.)

b) für chemische Vorgänge.

Quecksilberoxyd, ein rötliches Pulver, wird beim Erwärmen zunächst schwarz und zeigt dann an seiner Oberfläche einen metallischen Belag, der aus Quecksilber besteht, während sich ausserdem Sauerstoff, ein Gas, entwickelt, in dem ein glühender Körper hell aufleuchtet. (Chemische Analyse.)

Quecksilber und Schwefel im Gewichtsverhältnisse 25 : 4 zusammengerieben und dann vorsichtig erwärmt, setzen sich an den Wänden eines Reagenzgläschens in Form eines stahlgrauen Pulvers an, das beim Reiben als ein roter, homogener Körper (Zinnober) erscheint. (Chemische Synthese.)

Wird Kupferchlorid, Eisenvitriol oder ein ähnliches Salz mit Kalilauge versetzt, so entsteht ein unlöslicher, farbiger, metallischer Niederschlag, und eine helle Lösung von Chlorkalium bzw. schwefelsaurem Kali. (Chemische Lösung.)

Wasser hat bei 4° C. seine grösste Dichte; bei einer tieferen oder höheren Temperatur dehnt es sich aus, bei 0° wird es zu Eis, bei 100° geht es in Dampf über.

Wasser lässt sich, etwas angesäuert, durch den elektrischen Strom (mittelst eines Zersetzungsapparates 106.b) in zwei Gase, Sauerstoff und Wasserstoff zerlegen, deren Volumina sich wie 1:2 verhalten.

Aufgabe der Physik ist es also, die oben erwähnten allgemeinen Eigenschaften der natürlichen Körper festzustellen, die unter gegebenen Bedingungen eintretenden Änderungen dieser Eigenschaften nachzuweisen, sowie diejenigen Erscheinungen zu untersuchen, welche wir Schall, Licht, Wärme, Magnetismus und Elektrizität nennen.

Die Chemie dagegen hat es mit den stofflichen Änderungen zu thun; sie zeigt, wie sich ein Stoff in zwei oder mehrere Stoffe von wesentlich anderen Eigenschaften zerlegen und wie sich umgekehrt aus zwei oder mehreren Stoffen ein neuer Stoff zusammensetzen lässt; sie stellt aber nicht bloss die Art der Stoffe fest, sondern auch das Gewichts- oder Volumverhältnis, in welchem die Bestandteile unter sich und zum Ganzen stehen.

Erster Abschnitt.

Von den Kräften.

A. Von den Kräften im allgemeinen.

15. Begriffsbestimmung. Mass der Kräfte.

Kraft nennen wir jede Ursache, welche in dem Bewegungszustande (8.) eines Körpers eine Änderung hervorbringt oder hervorzubringen sucht.

Die Zustandsänderung eines Körpers (Verschiebung, Drehung des ganzen Körpers oder seiner Teilchen) bezeichnen wir als Wirkung von Kräften.

Der Punkt eines Körpers, auf welchen eine Kraft unmittelbar einwirkt, heisst Angriffspunkt der Kraft, die Richtung, in welcher sie den Körper zu ziehen oder zu schieben strebt, Richtung der Kraft. Die Kräfte sind an Grösse verschieden.

Eine Kraft ist durch ihren Angriffspunkt, ihre Richtung und ihre Grösse vollständig bestimmt.

Die Grösse einer Kraft wird gemessen durch das Gewicht eines Körpers, welches (mittels einer Rolle¹⁾ in der Richtung der zu messenden Kraft ziehend, dieselbe Wirkung hervorbringt wie diese. Krafteinheit ist demnach das Gramm- bzw. das Kilogrammgewicht.

Bemerkung. Eine Kraft lässt sich durch eine Strecke hinsichtlich ihrer drei Bestimmungspunkte bildlich darstellen.

16. Wirkung und Gegenwirkung.

Die Wirkung der Kräfte, welche zwei Körper aufeinander ausüben, ist stets eine gegenseitige; denselben Druck oder Zug, welchen *A* auf *B* ausübt, übt auch *B* auf *A* aus. (Newton-

¹⁾ Die Rolle hat auf die Grösse einer Kraft keinen Einfluss (siehe 30); sie dient nur dazu, die Kraftrichtung zu ändern.

sches Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung.)

17. Gleichgewicht. Statik. Dynamik. (Mechanik.)

Bleibt ein Körper, an welchem mehrere Kräfte wirken, in dem Bewegungszustande, in dem er bereits war, so sagt man, die Kräfte halten sich Gleichgewicht.

Sind Kräfte, die an einem Körper wirken, nicht im Gleichgewichte, so muss er sich bewegen, oder, falls er schon in Bewegung war, diese ändern.

Die Lehre vom Gleichgewichte der Kräfte heisst Statik, die von der Bewegung der Körper durch Kräfte Dynamik, die Lehre von den Kräften und Bewegungen überhaupt Mechanik.

B. Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften.

a) Kräfte, welche an einem Punkte angreifen.

18. Kräfte von gleicher und entgegengesetzter Richtung. Resultante. Komponenten.

α) Versuch. Hängt man über eine Rolle eine Schnur und befestigt an dem einen Ende derselben einen Körper, so tritt Gleichgewicht ein, wenn man an dem anderen Ende ein Gewichtstück von einer bestimmten Grösse z. B. a Gramm anbringt; es tritt aber auch Gleichgewicht ein, wenn man statt dieses einen Gewichtstückes mehrere anhängt, deren Summe aber wieder a Gramm beträgt.

Gesetz. *Eine Kraft lässt sich demnach ersetzen durch eine Summe von Kräften, welche denselben Angriffspunkt haben und in der gleichen Richtung wirken und umgekehrt.*

Erklärung. Eine Kraft, welche die gleiche Wirkung hervorbringt, wie mehrere am gleichen Punkte angreifende Kräfte heisst die Resultante dieser Kräfte, letztere ihre Komponenten.

β) Versuch. Befestigt man an einem sehr kleinen Körper zwei Schnüre, führt diese über zwei Rollen und hängt an den Enden derselben gleiche Gewichte an, so tritt Gleichgewicht ein.

Gesetz. *Gleiche, an demselben Punkte in entgegengesetzter Richtung wirkende Kräfte stehen im Gleichgewichte.*

Folgerungen. 1. Um die Wirkung einer Kraft aufzuheben, d. h. um Gleichgewicht herzustellen, braucht man also nur an ihrem Angriffspunkte eine ihr gleiche Kraft in entgegengesetzter Richtung anzubringen.

2. Wirken an einem Punkte zwei ungleiche Kräfte in entgegengesetzter Richtung, etwa $P > Q$, so wird nach dem vorigen die Wirkung der Kraft Q durch den einen Summanden Q der Kraft P aufgehoben; zur Geltung kommt nur der andere Summand $P - Q$ der Kraft P in ihrer Richtung.

Gesetz. *Die Resultante zweier an einem Punkte in entgegengesetzter Richtung wirkenden Kräfte ist der Differenz dieser Kräfte gleich und wirkt in der Richtung der grösseren Kraft.*

19. Das Kräfteparallelogramm.

Versuch. Führt man eine Schnur, an deren Enden zwei beliebige Gewichte P , Q befestigt sind, über zwei Rollen und bringt an der Schnur zwischen den Rollen ein drittes Gewicht R , dieses aber mittelst eines Ringes so an, dass sein Angriffspunkt auf der Schnur verschiebbar ist, so werden die Gewichte P und Q gehoben, R sinkt herab und am Angriffspunkte von R bildet die Schnur einen Winkel; immer aber tritt Gleichgewicht ein, so lange $R < P + Q$ ist. Wie nun auch sonst die Gewichte P , Q , R gewählt werden mögen, der Winkel, welchen die Richtungen der Kräfte P und Q , sowie die Winkel, welche die Gerade, längs deren R wirkt mit den Richtungen von P und Q bildet, sind stets ebenso gross wie die eines Parallelogramms $ABDC$ (Fig. 1), dessen eines Eck A , der Angriffspunkt der Kräfte, dessen Seiten AB und AC den Masszahlen der Kräfte P und Q und dessen Diagonale AD der Masszahl der Kraft R proportional ist.

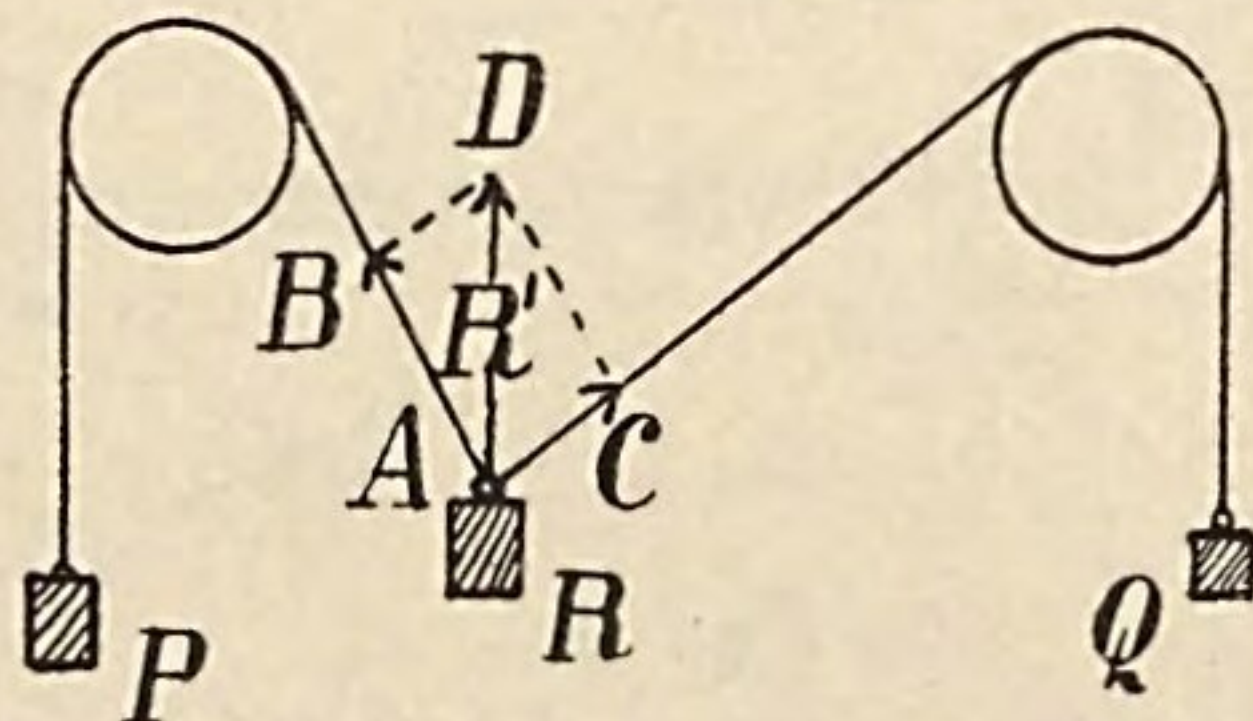


Fig. 1.

Nun hält aber eine Kraft R' , welche der Kraft R gleich ist, aber in entgegengesetzter Richtung zu R wirkt, also der Grösse und Richtung nach durch die Diagonale AD des Parallelogramms $ABDC$ bestimmt ist, der Kraft R (nach 18 β) ebenfalls Gleichgewicht; also muss R' die Resultante von P und Q sein. Daher der Satz: *Die Resultante zweier an einem Punkte in verschiedenen Richtungen wirkenden Kräfte lässt sich der Grösse und Richtung nach dar-*

stellen durch die Diagonale eines Parallelogramms, dessen Seiten der Grösse und Richtung nach die beiden gegebenen Kräfte darstellen. (Kräfteparallelogramm. Stevin. 1605.)

Zusatz. 1. Wirken an einem Punkte mehr als zwei Kräfte, so ergibt sich (auf geometrischem Wege) ihre Resultante, indem man für je zwei Kräfte die Resultante bestimmt, dann für jedes Paar dieser Resultanten wieder die Resultante u. s. f.

Zusatz 2. Wirken an einem Punkte n Kräfte derartig, dass die Resultante von je $n-1$ derselben an Grösse der n ten Kraft gleich, aber der Richtung nach entgegengesetzt ist, so halten sich die n Kräfte Gleichgewicht.

20. Zerlegung von Kräften.

Umgekehrt lässt sich eine Kraft ersetzen oder wenigstens ersetzt denken durch zwei oder mehrere am nämlichen Punkte

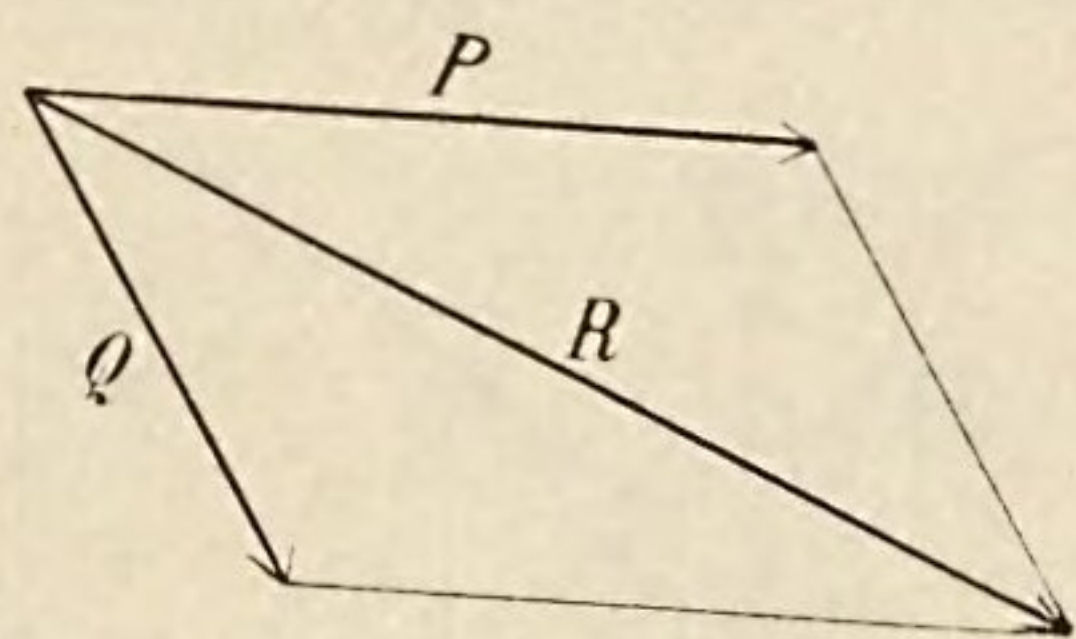


Fig. 2.

angreifende Kräfte, wenn die erstere als Resultante der letzteren erscheint; so lässt sich z. B. eine Kraft R (Fig. 2) stets durch zwei andere am gleichen Punkte angreifende Kräfte P und Q ersetzen, wenn letztere der Grösse und Richtung nach die Seiten eines Parallelo-

gramms bilden, dessen Diagonale die erstere Kraft darstellt.

Anwendungen: Segelschiff, Windmühle, Leinritt.

Bemerkung. Die Aufgabe, zu zwei an einem Punkte wirkenden Kräften die Resultante zu bestimmen, oder eine Kraft in zwei Komponenten zu zerlegen, lässt sich daher stets auf die geometrische Aufgabe zurückführen, ein Parallelogramm aus (drei) gegebenen Stücken zu konstruieren oder zu berechnen.

b) Kräfte, welche an zwei oder mehreren fest verbundenen Punkten wirken.

21. Kräfte, deren Richtungen in die gerade Verbindungslinie ihrer Angriffspunkte fallen.

Erfahrung. Der Angriffspunkt einer Kraft lässt sich in der durch ihre Richtung bestimmten Geraden beliebig verschieben, wenn nur der neue Angriffspunkt mit dem ursprünglichen fest verbunden ist.

Folgerungen. 1. Die Resultante zweier (oder mehrerer) Kräfte, deren Richtungen in die gerade Verbindungslinie ihrer

fest verbundenen Angriffspunkte fallen, ist daher gleich der Summe bzw. Differenz der gegebenen Kräfte.

2. Wirken zwei gleiche Kräfte an zwei fest verbundenen Punkten längs der durch ihre Verbindungslinie bestimmten Geraden in entgegengesetzter Richtung, so heben sich ihre Wirkungen auf.

3. Eine Kraft ist wirkungslos, wenn irgend ein Punkt der durch ihre Richtung bestimmten Geraden befestigt und mit ihrem Angriffspunkte fest verbunden ist.

22. Parallele Kräfte an fest verbundenen Punkten.

a) Parallele Kräfte von gleicher Richtung.

α) Versuch. Ein Stab, der an allen Stellen den gleichen Querschnitt hat und durchweg aus demselben Stoffe besteht, sei in einem Punkte H , der nahe am Mittelpunkte seiner oberen Längskante liegt (Fig. 3) so aufgehängt, dass er sich um eine durch diesen Punkt gehende feste, horizontale

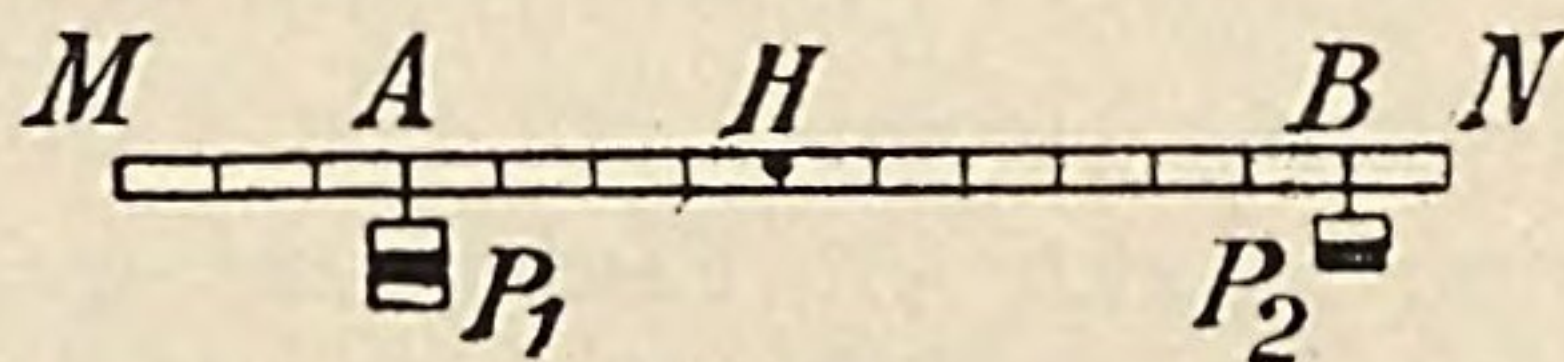


Fig. 3.

Achse drehen kann; der Stab stellt sich horizontal ein. Hängt man nun an irgend einem anderen Punkte A des Stabes ein Gewicht P_1 an, so dreht sich der Stab um H und zwar der Teil HA , an welchem P_1 hängt, nach abwärts, HN aufwärts. Bringt man aber auf HN in einem Punkte B noch ein Gewicht P_2 von solcher Grösse an, dass zwischen den Masszahlen der Gewichte und denen der Entfernungen ihrer Angriffspunkte von der Drehachse die Gleichung besteht $P_1 \cdot AH = P_2 \cdot BH$, so stellt sich der Stab wieder horizontal ein.

Das Produkt aus der Grösse einer Kraft in die Entfernung eines Punktes von der Geraden, längs welcher sie wirkt, nennt man nun das Moment der Kraft in Bezug auf jenen Punkt; also ergibt sich aus obigem Versuche das

Gesetz: Parallele Kräfte, welche an zwei fest verbundenen Punkten in derselben Richtung wirken, halten sich bei der Drehung um eine feste Achse Gleichgewicht, wenn ihre Drehmomente in Bezug auf diese Achse einander gleich sind, ihr Drehungssinn aber entgegengesetzt ist.

β) Versuch. Bringt man statt des Gewichtes P_2 in B zwei Gewichte P_3 und P_4 in den Punkten F und G (Fig. 4) so

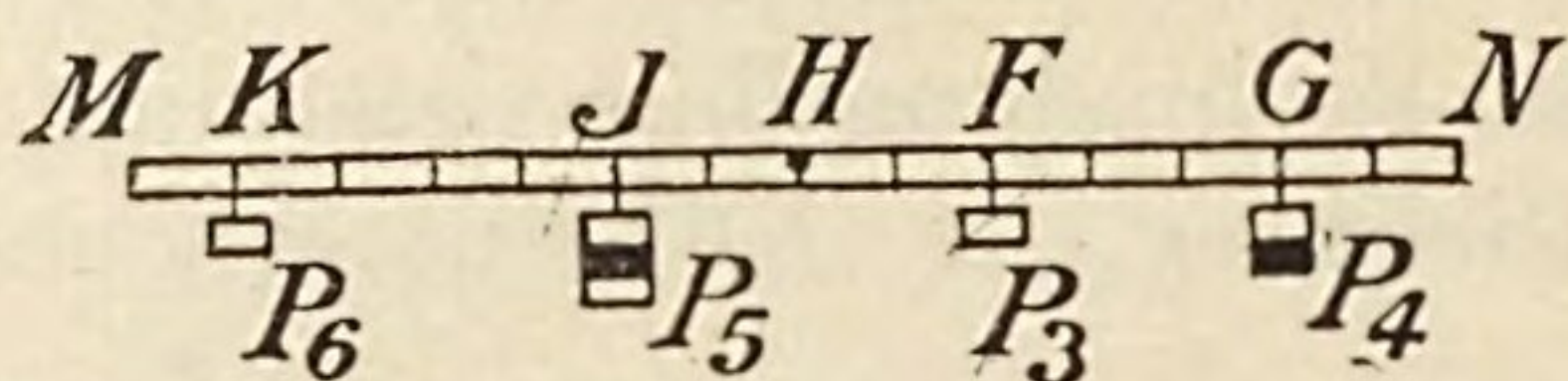


Fig. 4.

an, dass $P_2 \cdot BH = P_3 \cdot FH + P_4 \cdot GH$, so hält das Gewicht P_1 in A diesen Gewichten ebenfalls Gleichgewicht; ebenso lässt sich das Gewicht P_1 in A durch die

Gewichte P_5 in J und P_6 in K ersetzen, wenn nur $P_1 \cdot AH = P_5 \cdot JH + P_6 \cdot KH$ ist.

Gesetz. *Parallele Kräfte, welche an beliebigen, fest verbundenen Punkten in derselben Richtung wirken, halten sich bei der Drehung um eine feste Achse Gleichgewicht, wenn die Summe der Momente der in dem einen Sinne drehenden Kräfte der Summe der Momente der in dem anderen Sinne drehenden Kräfte in Bezug auf diese Achse gleich ist.*

Zusatz. Umgekehrt gibt es bei parallelen Kräften von gleicher Richtung, welche an fest verbundenen Punkten wirken, stets einen Punkt, in Bezug auf welchen die Summe der Momente aller rechts drehenden Kräfte gleich der Summe der Momente aller links drehenden Kräfte ist; die Lage dieses Punktes ändert sich nicht, wenn die Richtungen aller parallelen Kräfte um denselben Winkel im gleichen Sinne gedreht werden.

γ) Versuch. Befestigt man den obigen Stab in H an einem Faden und führt diesen über eine Rolle (Fig. 5), so hält ihm allein

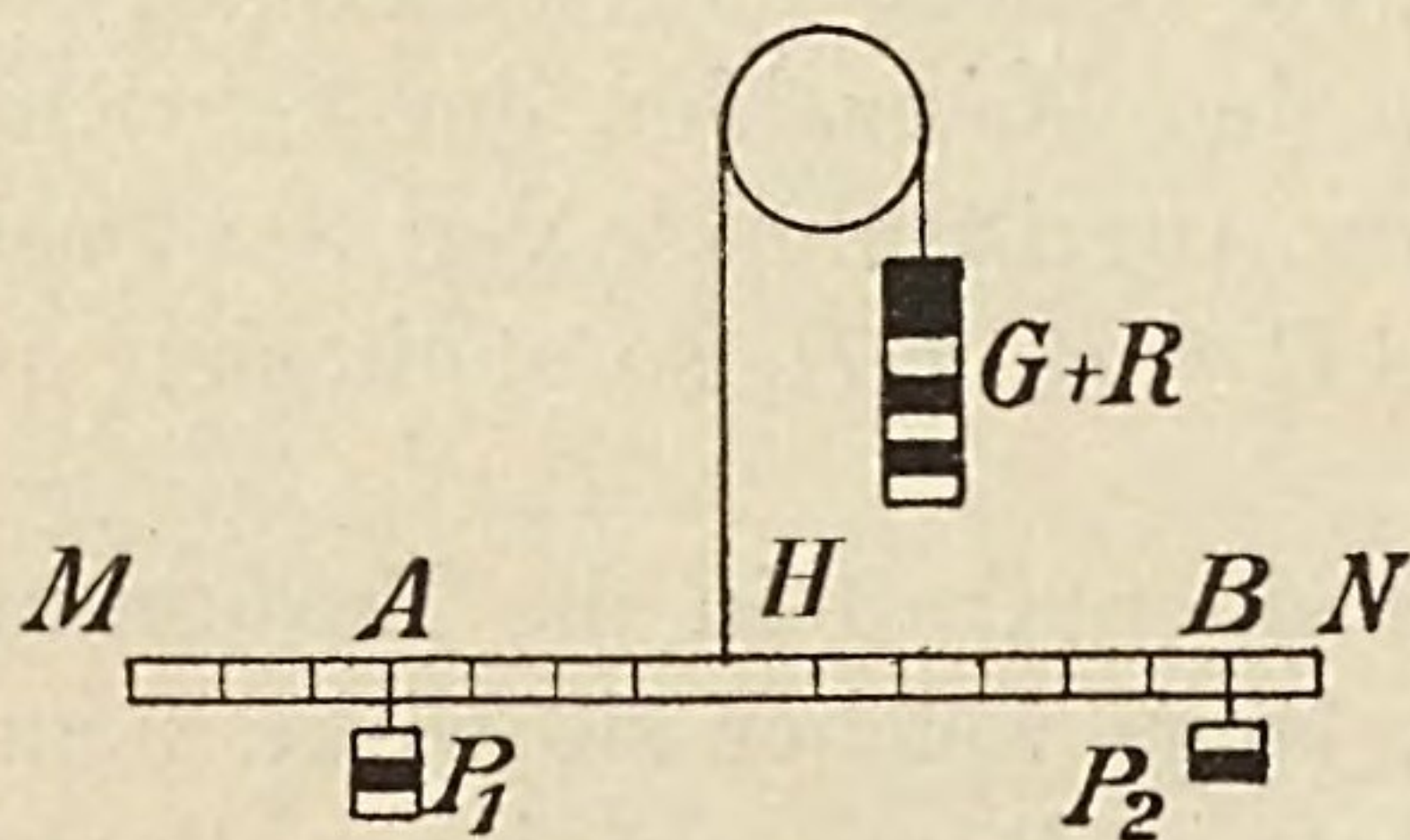


Fig. 5.

ein Gewicht G Gleichgewicht; hängt man aber die oben genannten Gewichte P_1 und P_2 an denselben, so muss man, wenn er sich nicht abwärts bewegen soll, am Gewichte G noch ein Gewicht $R = P_1 + P_2$ anbringen. Die Resultante R' der Kräfte P_1 und P_2 ist daher ebenfalls gleich $P_1 + P_2$,

greift in H an und hat mit P_1 und P_2 gleiche Richtung.

Gesetz. *Die Resultante paralleler, gleich gerichteter Kräfte, welche an fest verbundenen Punkten wirken, ist gleich der Summe dieser Kräfte, wirkt in derselben Richtung und greift in dem Punkte*

an, in Bezug auf welchen sich die Drehbewegungen der Kräfte aufheben.

b) Parallele Kräfte von entgegengesetzter Richtung.

Versuch. Lässt man wieder, wie oben bei α , in einem Punkte A auf dem Teile HM des Stabes ein Gewicht P_1 als Kraft wirken, befestigt aber in einem Punkte L desselben Teiles einen Faden, der an seinem anderen Ende ein Gewicht P_2 trägt und führt diesen über eine Rolle und zwar so, dass P_2 zwar parallel zu P_1 , aber in entgegengesetzter Richtung an der Stange wirkt wie P_1 , so tritt wieder keine Drehbewegung ein, sobald $P_1 \cdot AH = P_2 \cdot LH$ ist. Um aber ein Abwärtsbewegen der Stange hintanzuhalten, genügt hier die Kraft $R = P_1 - P_2$ (falls $P_1 > P_2$ ist).

Gesetz. *Parallele Kräfte von entgegengesetzter Richtung sind also hinsichtlich einer Drehbewegung unter denselben Bedingungen im Gleichgewichte wie solche von gleicher Richtung (22. a.); ihre Resultante ist aber gleich der Differenz zwischen den in der einen und den in der anderen Richtung wirkenden Kräften.*

Zusatz. Sind zwei parallele Kräfte von entgegengesetzter Richtung einander gleich, so ist ihre Resultante gleich Null; sie können also durch keine Einzelkraft ins Gleichgewicht gebracht werden; zwei solche Kräfte nennt man ein Kräftepaar, den senkrechten Abstand ihrer Richtungen den Arm, das Produkt aus einer Kraft in den Arm das Moment des Kräftepaares. Ein Kräftepaar wird durch ein anderes von entgegengesetzter Drehungsrichtung, aber gleichem Momente ins Gleichgewicht gebracht.

Bemerkung. Die Sätze über das Gleichgewicht und die Resultante paralleler Kräfte ergeben sich übrigens als eine notwendige Folge früherer Sätze. Wirkt nämlich in A (Fig. 6) die Kraft P_1 und in B parallel zu dieser die Kraft P_2 , so kann man (nach 21.) ohne jede Änderung des Bewegungszustandes in A noch eine Kraft Q_1 , in B eine Kraft Q_2 von gleicher Grösse anbringen, beide längs der Geraden AB aber im entgegengesetzten Sinne wirkend; dann lassen sich die Kräfte P_1 und Q_1 durch ihre Resultante R_1 , ebenso P_2 und Q_2 durch R_2 ersetzen: der Angriffspunkt der Kräfte R_1 und R_2 kann nun in den Schnittpunkt C

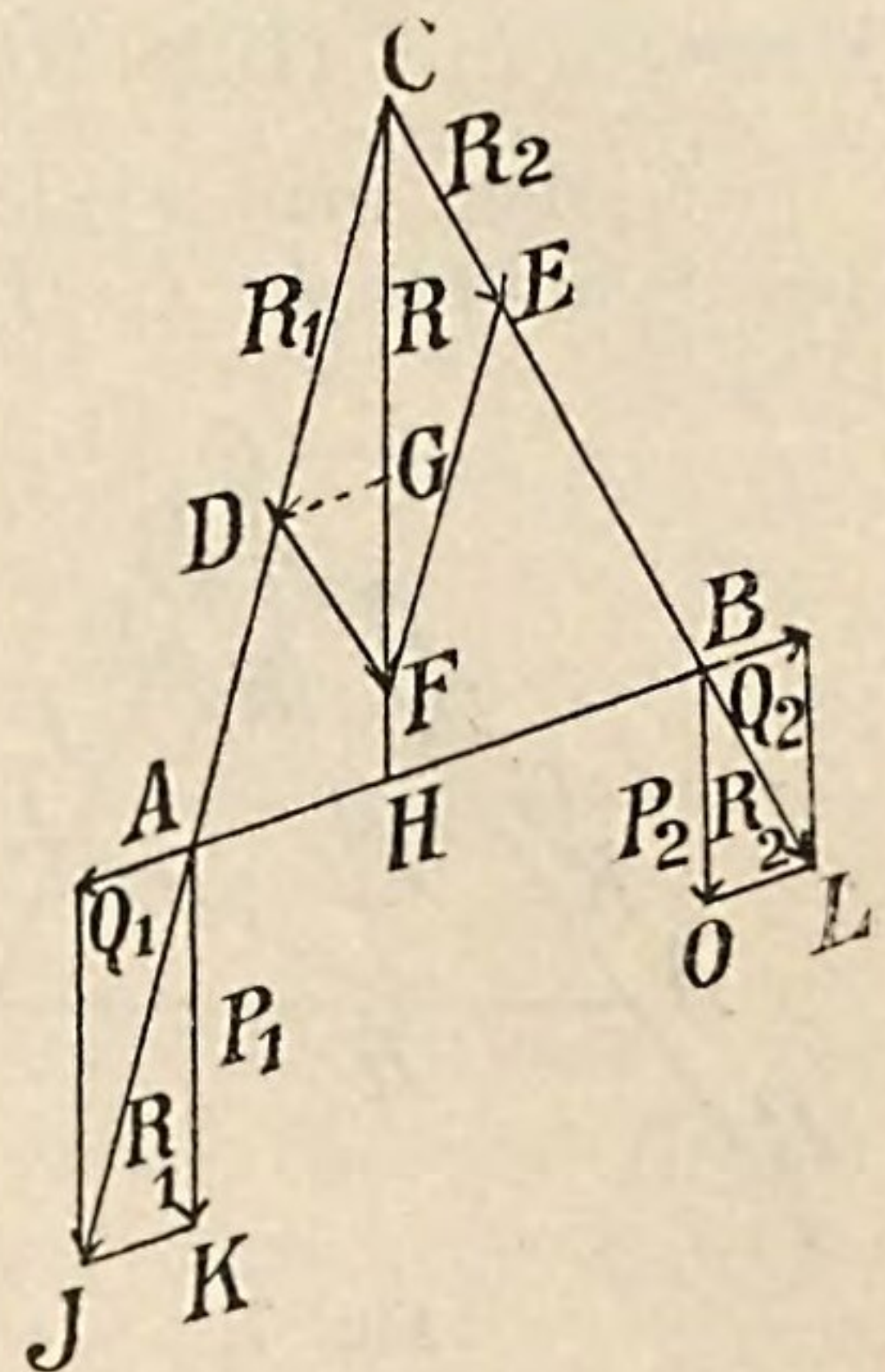


Fig. 6.

der durch ihre Richtungen bestimmten Geraden verlegt werden (21); also stellt die Diagonale CF des Parallelogramms $CDFE$, in welchem $CD = R_1$ und $CE = R_2$ ist, die Resultante der Kräfte R_1 und R_2 , also auch die der Kräfte P_1 und P_2 der Grösse und Richtung nach dar. Geht die feste Drehungsachse durch irgend einen Punkt der Geraden CF , so tritt Gleichgewicht ein, wenn dieser Punkt mit den Angriffspunkten A und B der Kräfte P_1 und P_2 fest verbunden ist. Zieht man nun $DG \parallel AB$, so ist $\triangle CDG \cong \triangle AJK$ und $\triangle FDG \cong \triangle BLO$, also $CG = P_1$ und $FG = P_2$; folglich die Resultante $CF = R = P_1 + P_2$.

Da ferner

$$AH : HC = JK : AK = Q_1 : P_1$$

und

$$HC : BH = BO : LO = P_2 : Q_2$$

so ist

$$AH : BH = P_2 : P_1 \text{ oder } P_1 \cdot AH = P_2 \cdot BH.$$

23. Kräfte von beliebiger Richtung an fest verbundenen Punkten.

Versuch. Befestigt man an einem Punkte A des um seinen Mittelpunkt H drehbaren homogenen Stabes MN (Fig. 3) einen Faden, der an seinem anderen Ende ein Gewicht P_1 trägt und führt diesen über eine Rolle, aber so, dass die Kraft P_1 an dem Stabe in schiefer Richtung wirkt, so wird der Stab ebenfalls aus seiner horizontalen Lage gebracht. Lässt man aber auf entsprechende Weise in einem anderen Punkte B des Stabes ebenfalls in schiefer Richtung eine Kraft P_2 angreifen, so kommt der Stab unter gewissen Bedingungen wieder ins Gleichgewicht. Diese Bedingungen sowie die Bestimmung der Resultante der Kräfte P_1 und P_2 lassen sich in ähnlicher Weise wie bei parallelen Kräften mit Hilfe früherer Sätze feststellen.

Verlegt man wieder den Angriffspunkt der Kräfte P_1 und P_2 in den Schnittpunkt C (Fig. 7) der durch ihre Richtungen bestimmten Geraden, macht also $CD = P_1$ und $CE = P_2$, so stellt die Diagonale CF des Parallelogramms $CDFE$ die Resultante von P_1 und P_2 dar. Gleichgewicht ergibt sich, sobald die Drehungsachse durch einen Punkt auf der Geraden CF geht.

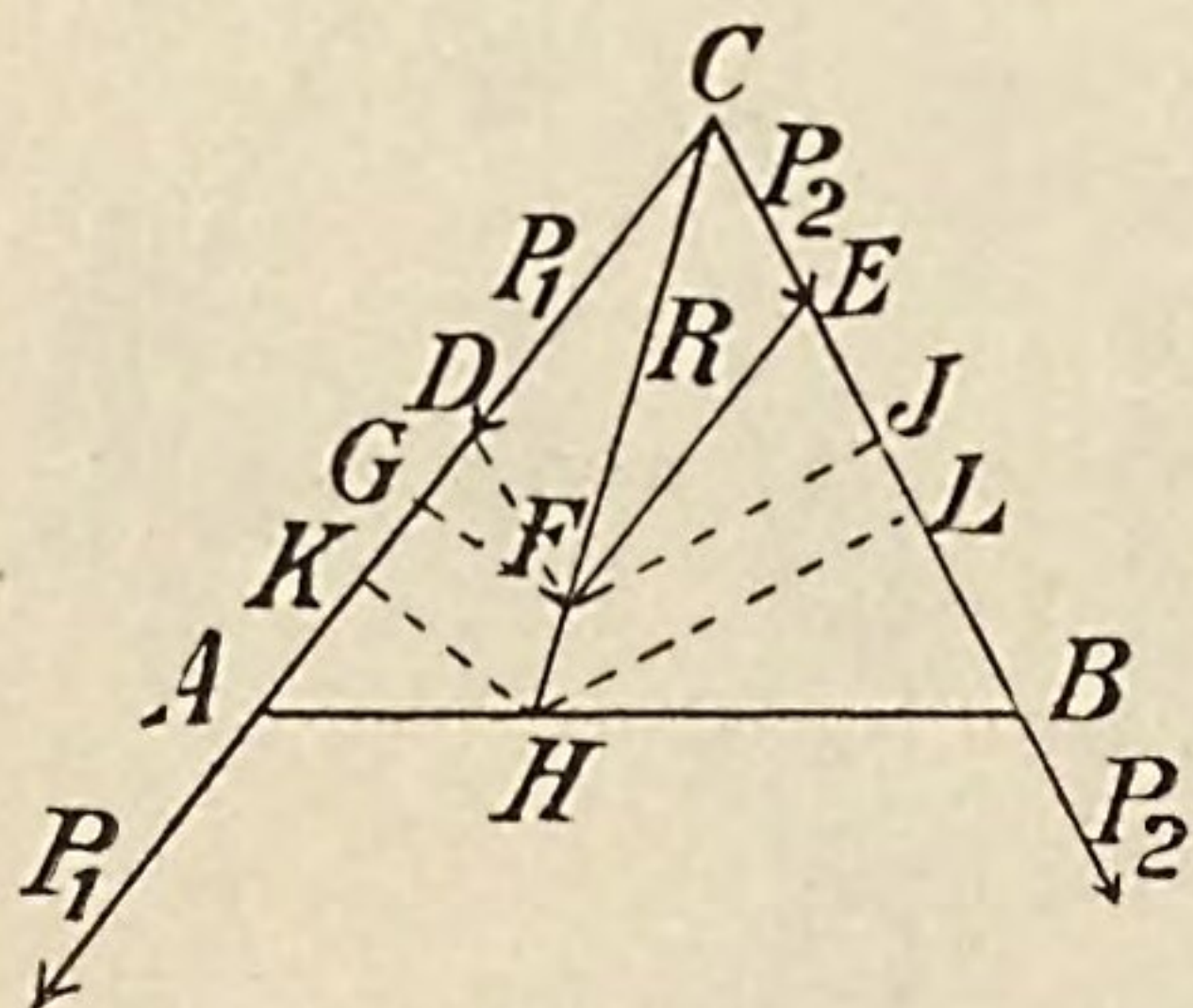


Fig. 7.

Fällt man nun die Senkrechten FG und FJ auf die Geraden CA und CB , so ist, da die Dreiecke CDF und CEF kongruent, also auch gleich sind, $CD \cdot FG = CE \cdot FJ$ oder $CD : CE =$

$FJ : FG$, d. h. $P_1 : P_2 = FJ : FG$. Ist aber H irgend ein anderer Punkt auf CF , etwa ihr Schnittpunkt mit AB und zieht man HK und HL senkrecht zu CA und CB , so ist $HL : FJ = HK : FG (= CH : CF)$

oder $HL : HK = FJ : FG$; also auch $P_1 : P_2 = HL : HK$ oder $P_1 \cdot HK = P_2 \cdot HL$.

Gesetz. Zwei nicht parallele Kräfte, welche an fest verbundenen Punkten wirken, halten sich daher ebenfalls bei der Drehung um eine Achse Gleichgewicht, wenn ihre Drehungsmomente in Bezug auf diese Achse einander gleich sind, ihr Drehungssinn aber entgegengesetzt ist. Ihre Resultante lässt sich der Grösse und Richtung nach darstellen als Diagonale eines Parallelogramms, dessen Seiten der Grösse und Richtung nach die gegebenen Kräfte darstellen, wenn der Angriffspunkt der letzteren in den Schnittpunkt der durch ihre Richtungen bestimmten Geraden verschoben wird. Angriffspunkt der Resultante kann jeder Punkt der durch diese Diagonale bestimmten Geraden sein, wenn er mit den Angriffspunkten der Kräfte fest verbunden ist.

C. Vom Schwerpunkte der Körper.

24. Begriffserklärung. Methoden zur Bestimmung des Schwerpunktes.

Ein jeder natürliche Körper ist (nach 5.) eine Verbindung von Molekeln, an welchen (nach 9.) die Schwere der Erde als Kraft wirkt. Nun lassen sich bei allen Körpern, deren Ausdehnungen im Vergleiche zu ihrer Entfernung vom Erdmittelpunkte sehr klein sind, die Richtungen der an den Molekeln wirkenden Schwerkkräfte ohne Fehler als parallel ansehen; die Resultante all dieser Schwerkkräfte ist daher (nach 22.) gleich ihrer Summe, die (nach 9.) durch das Gewicht des Körpers gemessen wird, wirkt ebenfalls in der Richtung gegen den Erdmittelpunkt und greift an einem Punkte an, in Bezug auf welchen sich die Drehmomente der an den Molekeln wirkenden Schwerkkräfte aufheben; dieser Punkt heisst Schwerpunkt.

Schwerpunkt eines Körpers ist daher derjenige Punkt, in welchem man sich das Gewicht desselben als Kraft in der Richtung gegen den Erdmittelpunkt wirkend denken kann; er ändert seine Lage in Bezug auf den Körper nicht, wenn dieser auch beliebig gedreht wird.

Wird ein Körper an einem Punkte seiner Oberfläche aufgehängt, so muss sein Schwerpunkt und der Aufhängepunkt in

einer durch den Erdmittelpunkt gehenden Geraden (Lotlinie, Schwerlinie) liegen. Experimentell lässt sich daher die Lage des Schwerpunktes eines Körpers bestimmen, indem man denselben an zwei beliebigen Punkten seiner Oberfläche aufhängt und die zu diesen Punkten gehörigen Lotlinien feststellt; der Schnittpunkt der letzteren ist der Schwerpunkt.

In manchen Fällen lässt sich aber der Schwerpunkt eines Körpers auf einfachere Weise finden. Ist ein Körper homogen, d. h. in allen Teilen gleich dicht, und besitzt er eine Symmetrieachse, d. h. gibt es eine Gerade, in Bezug auf welche die Masse des Körpers völlig gleichmässig verteilt ist, so liegt der Schwerpunkt (nach 22.) auf dieser Geraden; sind zwei Dimensionen des Körpers im Verhältnisse zur dritten oder eine Dimension im Vergleiche mit den beiden anderen sehr klein, so lässt sich der Körper als schwere Linie bzw. als schwere Fläche betrachten.

So ist z. B. der Schwerpunkt einer schweren homogenen Strecke ihr Mittelpunkt; der Schwerpunkt eines Kreises, einer Kugel liegt, falls sie homogen sind, im Mittelpunkte, weil jeder Durchmesser eine Symmetrieachse der genannten Gebilde ist. Der Schwerpunkt eines Dreiecks ist der Schnittpunkt seiner Mittellinien; denn diese sind Symmetrieachsen des Dreiecks; aus demselben Grunde ist der Schwerpunkt eines Parallelogramms, eines regelmässigen Vielecks, eines regelmässigen Körpers der Schnittpunkt der Diagonalen, der eines geraden Cylinders der Mittelpunkt seiner Achse.

Auch für andere einfache Linien, Flächen oder Körper lässt sich der Schwerpunkt durch Konstruktion oder Berechnung bestimmen, wenn man dieselben in Teile zerlegen kann, deren Schwerpunkte nach Obigem angegeben werden können; denkt man sich nämlich in den Schwerpunkten S_1 und S_2 zweier zusammen ein Ganzes bildenden Teile ihre Gewichte G_1 und G_2 als Kraft wirken, so muss der Schwerpunkt S des Ganzen auf der Geraden $S_1 S_2$ so liegen, dass $G_1 \cdot \overline{S_1 S} = G_2 \cdot \overline{S_2 S}$ ist.

Eine Verschiebung der Teile eines Körpers hat auch eine Verschiebung seines Schwerpunktes zur Folge.

Zweiter Abschnitt.

Vom Gleichgewichte der Körper. (Statik.)

A. Vom Gleichgewichte fester Körper. (Geostatik.)

a) Feste, in einem oder in mehreren Punkten gestützte Körper.

25. Arten des Gleichgewichtes.

Ein um eine Achse drehbarer Körper ist nur dann im Gleichgewichte, wenn die Drehachse und der Schwerpunkt des Körpers in einer lotrechten Ebene liegen; denn in jeder anderen Lage bewirkt das im Schwerpunkte wirkende Gewicht eine Drehung des Körpers um die Drehachse und zwar stets so, dass der Schwerpunkt unter die Drehachse zu liegen kommt.

Befindet sich also der Schwerpunkt S eines Körpers unterhalb der Drehachse A (Fig. 8a), so nimmt der Körper nach einer Störung seines Gleichgewichtes stets wieder die ursprüngliche Gleichgewichtslage ein; man sagt, der Körper ist im stabilen Gleichgewichte; liegt aber der Schwerpunkt S oberhalb der Drehachse A (Fig. 8b), so kann der Körper, sobald sein Schwerpunkt aus der durch die Drehachse gehenden lotrechten Ebene heraustritt, in seine ursprüngliche Lage nicht mehr zurückkehren; der Körper war im labilen Gleichgewichte. Nur wenn die Drehachse A durch den Schwerpunkt S selbst geht (Fig. 8c), bleibt ein Körper in allen Lagen im Gleichgewichte, welches man deshalb indifferent nennt.

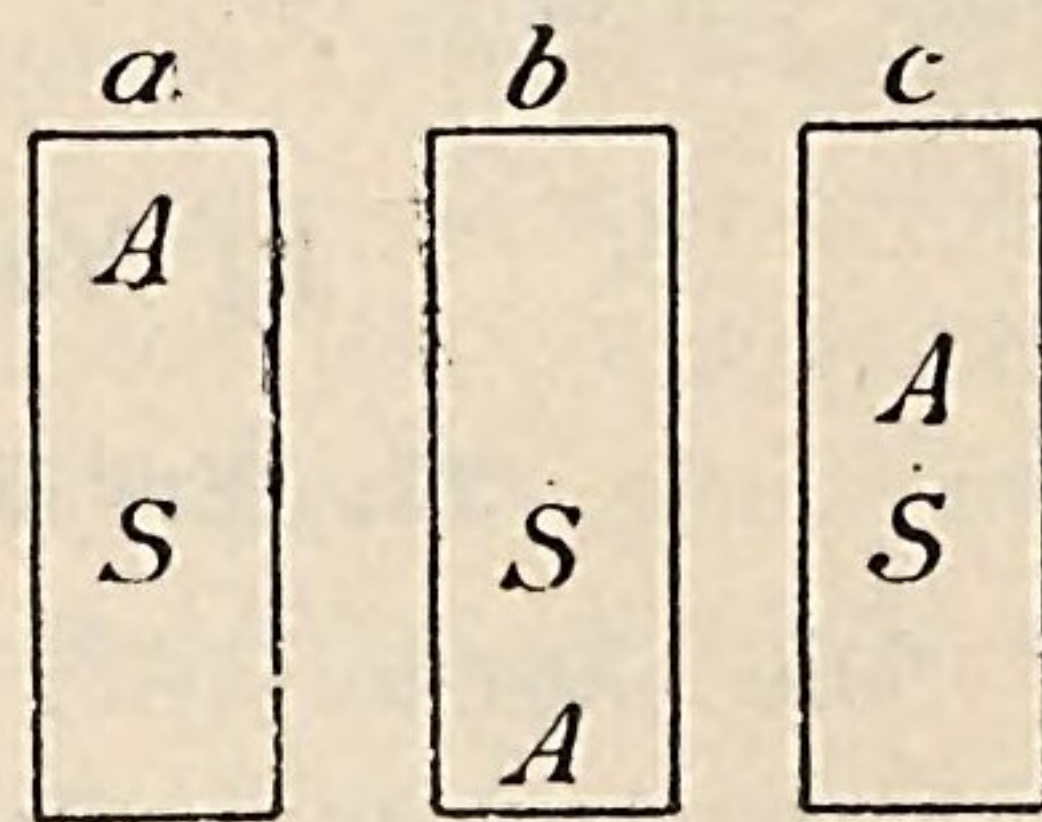


Fig. 8.

26. Standfestigkeit.

Stützt sich ein Körper mit drei oder mehreren seiner Punkte, die nicht in einer Geraden liegen, auf eine horizontale Ebene, so bleibt er im stabilen Gleichgewichte, wenn das durch seinen Schwerpunkt gehende Lot diese Ebene innerhalb des durch die Stützpunkte bestimmten Vielecks schneidet. Wirkt auf einen solchen Körper ausser der Schwerkraft noch eine Kraft, aber nicht in der Richtung gegen den Erdmittelpunkt, so wird sie den Körper umwerfen, sobald der Schnittpunkt der Resultante dieser beiden Kräfte mit der Unterlage über das oben erwähnte Vieleck hinausfällt; liegt dieser Schnittpunkt auf dem Umfange desselben, so kann der Körper der Kraft, welche ihn umzuwerfen sucht, eben noch Widerstand leisten. Diesen Widerstand nennt man die Standfestigkeit des Körpers.

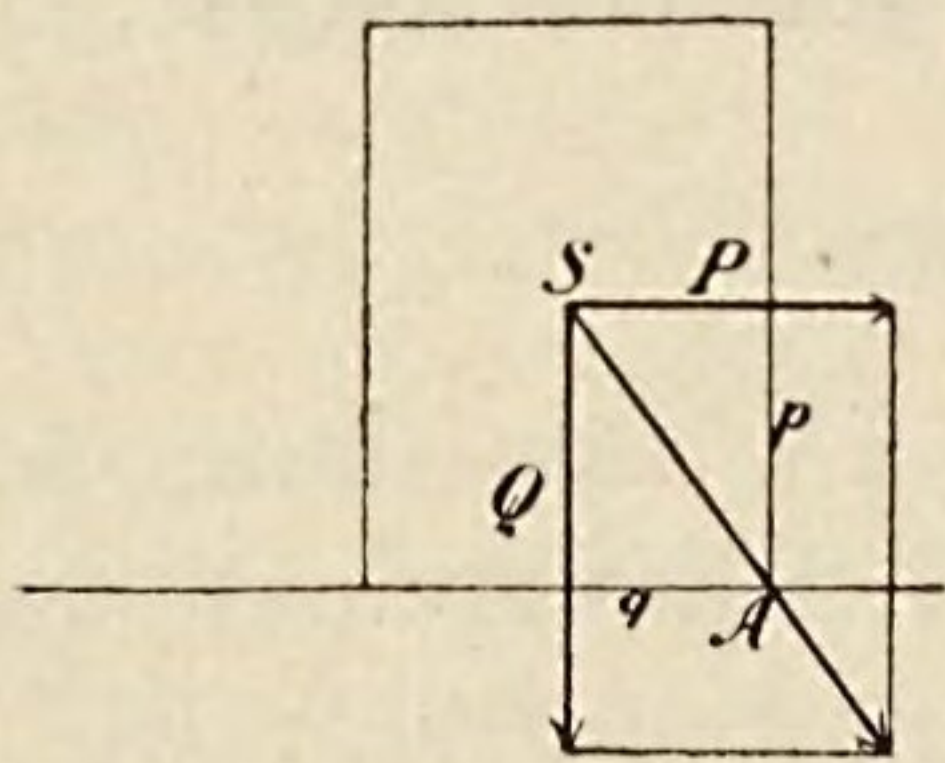


Fig. 9.

Ist (Fig. 9) A ein Punkt des genannten Umfanges, Q das Gewicht des Körpers, S sein Schwerpunkt, P die seitlich in S wirkende Kraft, welcher der Körper eben noch zu widerstehen vermag, also P ein Mass für die Standfestigkeit desselben, p und q die Entfernungen des Punktes A von der Richtung dieser Kräfte, so muss (nach 23) $P \cdot p = Q \cdot q$ sein und folglich

$$\text{ist } P = \frac{q}{p} \cdot Q.$$

Die Standfestigkeit eines Körpers ist also um so grösser, je schwerer er ist, je tiefer sein Schwerpunkt liegt und je weiter das durch den Schwerpunkt gehende Lot von der Umdrehungskante entfernt ist.

b) Von den einfachen Maschinen.

27. Erklärung. Arten von Maschinen.

Die Gesetze vom Gleichgewichte der Kräfte treten bei den Maschinen in Geltung. Unter einer Maschine verstehen wir jede Vorrichtung, mittelst deren die Wirkung einer Kraft, welche sich ja an und für sich nur in ihrer eigenen Richtung und nur auf einen in dieser Richtung liegenden Punkt äussern kann, in eine andere Richtung oder auf einen ausserhalb der Kraftrichtung liegenden Punkt übertragen wird. Der Zweck einer jeden Maschine besteht zunächst darin, irgend einer Kraft, einem Widerstande, Gleichgewicht zu halten; diesen Widerstand nennt

man gewöhnlich die Last, die an der Maschine wirksame Kraft kurzweg die Kraft.

Ein Teil der wirksamen Kraft muss stets zur Überwindung der in der Maschine selbst auftretenden Widerstände verwendet werden.

Alle Maschinen lassen sich auf zwei zurückführen, auf den Hebel und die schiefe Ebene; zu den einfachen Maschinen wird ausser diesen noch die Rolle, das Wellrad, der Keil und die Schraube gezählt; alle anderen Maschinen heissen zusammengesetzt.

28. Der Hebel.

Hebel nennt man jeden um eine Achse drehbaren, stabförmigen Körper, an welchem Kräfte wirken, die ihn um diese Achse im entgegengesetzten Sinne zu drehen suchen.

Ist dieser Körper gewichtslos, so heisst der Hebel mathematisch, sonst physikalisch; der letztere lässt sich nach 24. auf ersteren zurückführen, indem man sein Gewicht in seinem Schwerpunkte als Kraft wirken lässt.

Die Entfernung des Stützpunktes eines Hebels von den Richtungen der an demselben wirkenden Kräfte nennt man die Hebelarme dieser Kräfte. Wirken an einem mathematischen Hebel nur zwei Kräfte, so heisst derselbe zweiarmig, wenn sein Stützpunkt zwischen den Angriffspunkten der Kräfte, einarmig, wenn sein Stützpunkt ausserhalb der Verbindungsstrecke derselben liegt; sind die Hebelarme der beiden Kräfte gleich, so heisst der Hebel gleicharmig, ausserdem ungleicharmig.

Ein mathematischer Hebel, an welchem zwei Kräfte wirken, ist (nach 22 und 23) im Gleichgewichte, wenn die Drehmomente dieser Kräfte in Bezug auf den Stützpunkt des Hebels gleich sind, oder wenn Kraft und Last sich umgekehrt verhalten, wie ihre zugehörigen Hebelarme.

Die Wirkung einer Kraft ist daher um so grösser, je länger ihr Hebelarm im Vergleiche mit dem Hebelarme der Last ist.

Für den physikalischen Hebel gelten dieselben Gesetze wie für den mathematischen, wenn die Drehachse durch den Schwerpunkt der Hebelstange geht; ist dies nicht der Fall, so tritt (nach 22 und 23) dann Gleichgewicht ein, wenn das Drehmoment der Kraft gleich ist der Summe bzw. Differenz der Drehmomente

der Last und des im Schwerpunkte der Stange wirkenden Gewichtes derselben, je nachdem dieser Schwerpunkt auf dem Hebelarm der Last oder der Kraft liegt.

Viele Handwerkszeuge, wie das Brecheisen, die Zange, die Schere u. s. w., dann der Balken am Ziehbrunnen, die Griffstange an der Pumpe sind Hebel.

29. Die Wage.

Die Wage, eine Vorrichtung, welche dazu dient, das Gewicht oder die Masse (siehe 9) zweier Körper zu vergleichen, ist ebenfalls ein Hebel. Die zumeist gebrauchte Form derselben ist die gleicharmige Wage, welche man Krämerwage oder chemische Wage nennt, je nachdem sie für gröbere oder feinere Wägungen eingerichtet ist.

Jede Wage muss richtig und stabil, feinere Wagen müssen aber auch empfindlich sein. Richtig ist eine Wage, wenn die Drehmomente ihrer Arme mit den Wageschalen in Bezug auf den Aufhängepunkt der Wage gleich sind; stabil ist sie, wenn der Wagebalken bei gleicher Belastung der beiden Schalen horizontal stehend im stabilen Gleichgewichte bleibt; das kann nur dann der Fall sein, wenn der Schwerpunkt der Wage lotrecht unterhalb des Aufhängepunktes liegt (25). Empfindlich heisst eine Wage dann, wenn ein kleines Übergewicht auf einer Wageschale den Wagebalken um einen möglichst grossen Winkel von der horizontalen Lage ablenkt.

Ist (Fig. 10) der Wagebalken $AB = 2b$, dessen Aufhängepunkt C auf der Geraden AB liegt, dadurch aus der horizontalen Lage um den

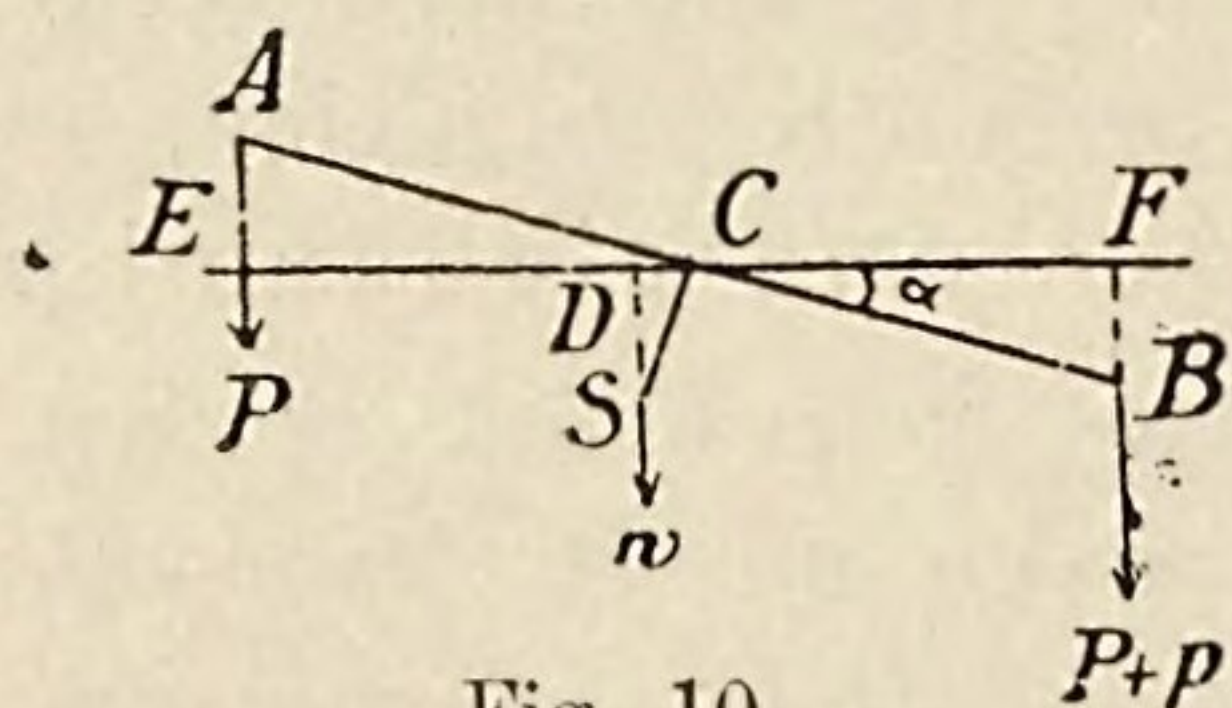


Fig. 10.

$\angle \alpha$ abgelenkt, dass in A das Gewicht P , in B das Gewicht $P + p$ wirkt und ist der Schwerpunkt S der Wage von C um $CS = a$ entfernt, setzt man ferner das Gewicht der Wage gleich w , so wird die Wage ins Gleichgewicht kommen, wenn $P \cdot CE + w \cdot CD = (P + p) \cdot CF$ ist oder wenn $w \cdot CD = p \cdot CF$ ist. Da nun

$\triangle CSD \sim \triangle BCF$, so ist $CD : CS = BF : BC$; also $w \cdot CS \cdot BF = p \cdot BC \cdot CF$; daher $BF : CF = (p \cdot b) : (w \cdot a)$. Da nun mit wachsendem Winkel α die Strecke BF zunimmt, CF aber abnimmt, also der Quotient $BF : CF$ wächst, so ist die Empfindlichkeit einer Wage durch diesen Quotienten, also auch durch seinen (rechts stehenden) Wert bestimmt; eine Wage ist demnach um so empfindlicher, je grösser ihre Wagebalken, je kleiner ihr Gewicht ist und je näher ihr Schwerpunkt am Aufhängepunkte liegt.

Ungleicharmig ist die sogenannte Schnellwage, bei welcher der Hebelarm der Last unveränderlich ist, der der

Kraft aber durch ein auf demselben verschiebbares Gewicht (Laufgewicht) verändert werden kann.

Ist (Fig. 11) C der Stützpunkt der Wage, $CB = b$ Hebelarm der Last Q , $CD = c$ Hebelarm der Kraft P , wenn die Wagschale, deren Gewicht W sei, unbelastet, $CA = a$ wenn sie belastet ist, so hat man im ersteren Falle $P \cdot c = W \cdot b$, im letzteren $P \cdot a = (Q + W) \cdot b$; also $P \cdot (a - c) = Q \cdot b$ und folglich $a - c = Q \cdot b : P$. Die Strecke $DA = a - c$ ist also unmittelbar ein Mass für die Last, da P und b an der Wage unveränderlich sind.

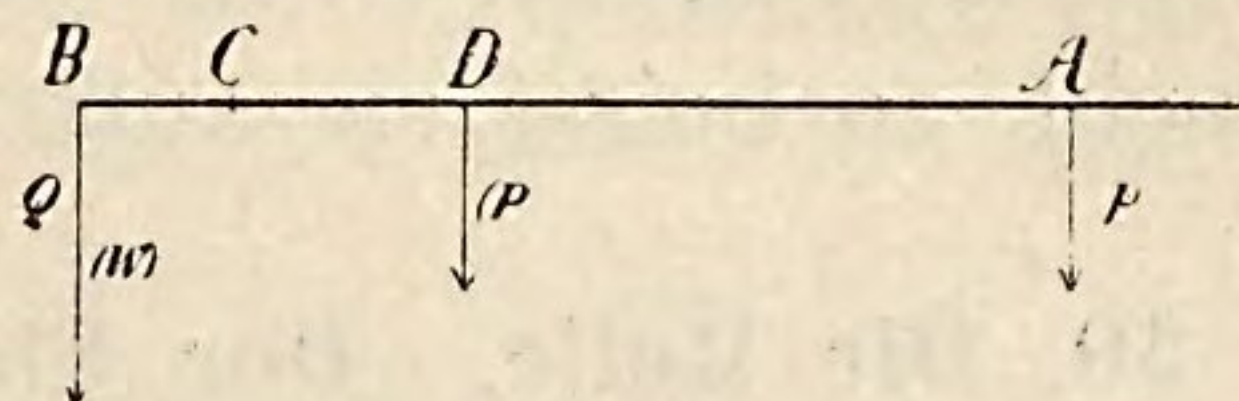


Fig. 11.

Auch die Zeigerwage (Briefwage) ist ein ungleicharmiger Hebel, dessen Stange eine im Stützpunkte gebrochene Linie ist; die Kraft ist ein unveränderliches Gewicht, ihr Hebelarm aber wie der der Last veränderlich. Drückt eine Last die Wagschale herab, so wird das Gewicht soweit gehoben, bis Gleichgewicht eintritt, d. h. bis die Momente von Kraft und Last gleich sind; dabei durchläuft das Gewicht einen Kreis, dessen Mittelpunkt der Aufhängepunkt ist. Die von dem Gewichte durchlaufenen Bogen sind der Last nicht proportional und werden, da ihre Berechnung etwas verwickelt ist, fast immer empirisch festgestellt.

Zur Wägung grösserer Lasten bedient man sich der Brückenwage. Das Brett EF (Fig. 12), die Brücke, ist einerseits in E mittelst der Stange CE an der Hebelstange BC , deren Stützpunkt A ist, aufgehängt, und stützt sich andererseits in F auf ein zweites Brett GH , das seinerseits wiederum in G mittelst der Stange DG an der Hebelstange BC befestigt ist, während es in H auf einer festen Unterlage aufliegt.

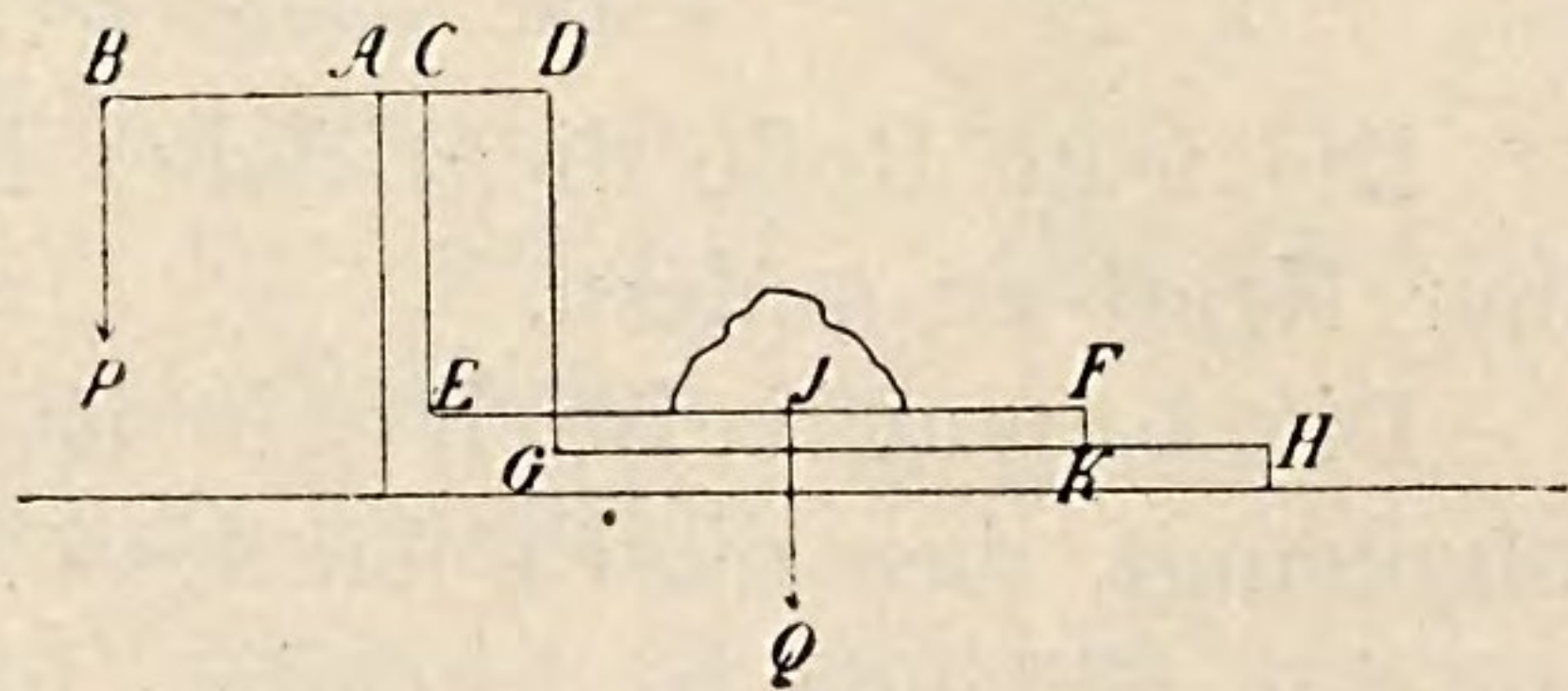


Fig. 12.

Die Last Q in J lässt sich durch zwei Komponenten ersetzen, von denen die eine Q_1 in E , die andere Q_2 in F wirkt, letztere aber wieder durch die Drucke Q_3 in G und Q_4 in H ; Q_4 wird durch den Gegenruck der Unterlage wirkungslos. Das Gewicht P in B hält also der Last Q Gleichgewicht, wenn $P \cdot AB = Q_1 \cdot AC + Q_3 \cdot AD$ ist.

Da nun das Gewicht Q_3 in G dieselbe Wirkung hervorbringt wie ein Gewicht Q_5 in E , wenn $Q_3 : Q_5 = AC : AD$ und da $Q_3 : Q_2 = KH : GH$, so ist, falls man $KH : GH = AC : AD$ macht, $Q_5 = Q_2$.

also $Q_3 \cdot AD = Q_2 \cdot AC$ und demnach Gleichgewicht, wenn $P \cdot AB = Q_1 \cdot AC + Q_2 \cdot AC$, d. h. wenn $P \cdot AB = Q \cdot AC$ ist. Die Wage wirkt also dann gerade so, als wenn die ganze Last Q in C aufgehängt wäre, gleichgiltig wo sie auf dem Brette EF wirklich liegen mag.

Da man bei dieser Wage gewöhnlich den Arm $AB = 10 AC$ macht, so heisst sie auch Dezimalwage.

30. Die Rolle. Der Flaschenzug. Das Rad an der Welle.

Die Rolle ist eine kreisförmige, um ihren Mittelpunkt drehbare Scheibe; an ihrem Umfange befindet sich eine Rinne, um ein Seil aufzunehmen; sie heisst fest, wenn die Achse, um welche sie sich dreht, fest ist, sonst beweglich. Bei der festen Rolle hängt die Last an dem einen Ende des Seiles, die Kraft wirkt am anderen.

An der festen Rolle ist im Falle des Gleichgewichtes die Kraft der Last gleich.

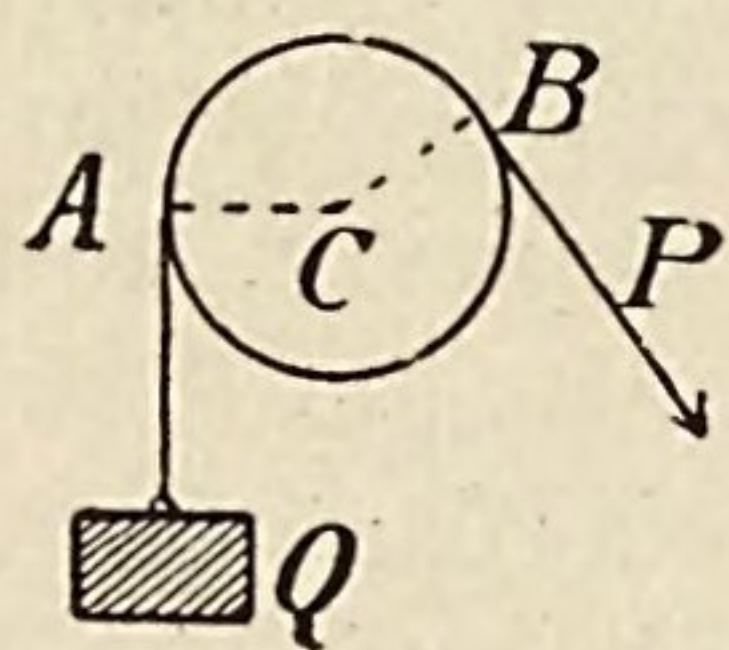


Fig. 13.

Dieses Gesetz lässt sich durch Versuche beweisen, ist aber auch eine Folge der vorhergehenden Gesetze: Die feste Rolle kann als ein Hebel betrachtet werden, dessen Stützpunkt ihr Mittelpunkt C ist (Fig. 13) und dessen Arme die zu den Punkten A und B des Umfanges gehörigen Radien sind, an welchen das Seil die Rolle verlässt. Einer an dem einen Seilende hängenden Last Q hält daher eine an dem anderen wirkende Kraft P bei beliebiger Richtung Gleichgewicht, wenn $P \cdot r = Q \cdot r$, d. h. wenn $P = Q$ ist.

Die feste Rolle dient daher lediglich dazu, die Richtung einer Kraft zu ändern.

Die bewegliche Rolle ist gewöhnlich an einem Seile so aufgehängt, dass die Enden desselben lotrecht, also parallel sind; das eine Seilende ist irgendwo befestigt, das andere über eine feste Rolle geführt; die Last ist an der Achse der beweglichen

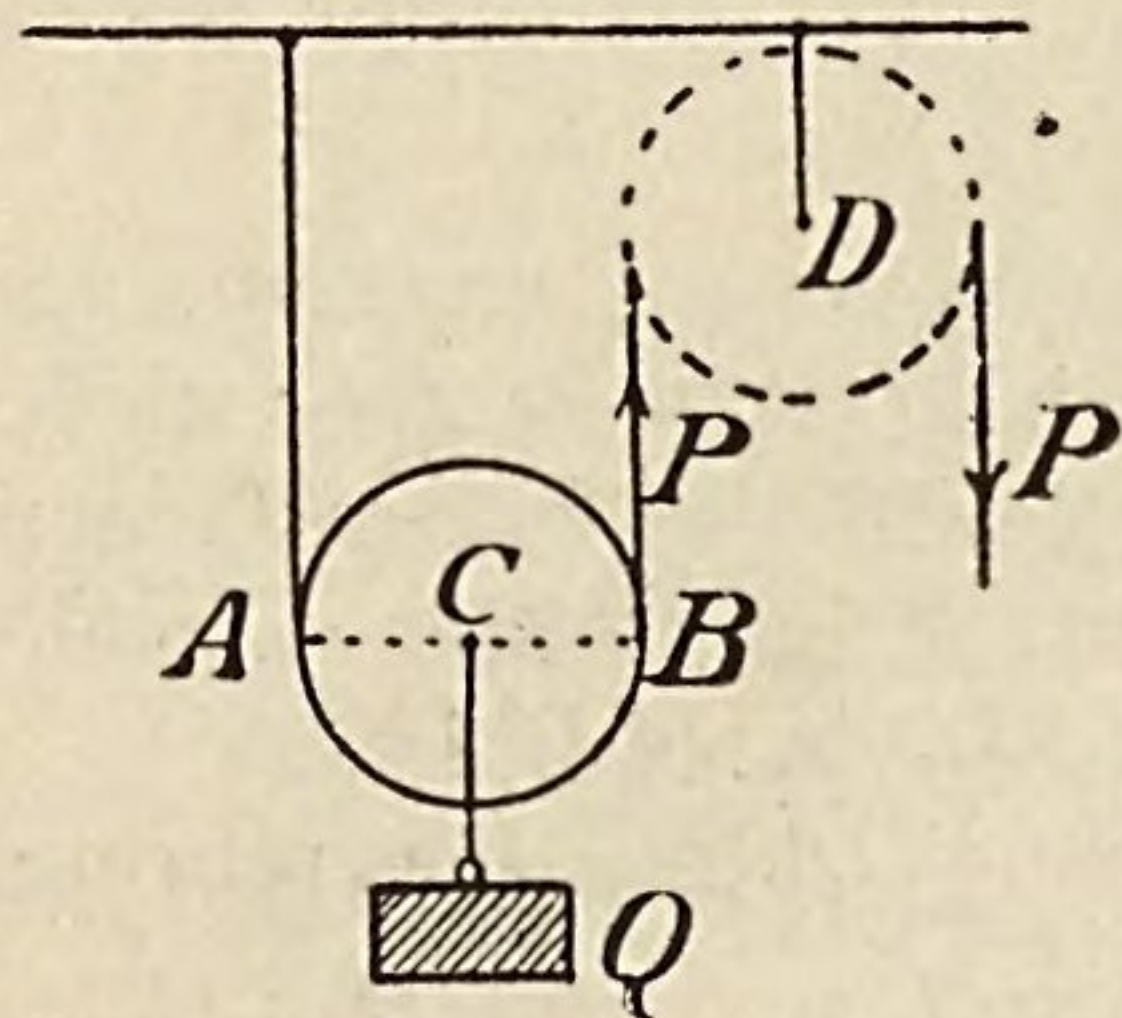


Fig. 14.

Rolle angebracht, die Kraft wirkt an dem nicht befestigten Ende des Seiles.

Bei lotrechter Seilrichtung ist an einer beweglichen Rolle Gleichgewicht vorhanden, wenn die Kraft halb so gross ist, wie die Last.

Die bewegliche Rolle lässt sich ebenfalls als ein Hebel betrachten, dessen Stützpunkt aber der Punkt A des Umfanges ist (Fig. 14), an welchem das befestigte

Seilende die Rolle verlässt; Hebelarm der Last ist demnach der Radius CA , der der Kraft aber der Durchmesser BA der Rolle; im Gleichgewichtszustande ist also $P \cdot 2r = Q \cdot r$; folglich $P = \frac{1}{2} Q$.

Zusatz. Ist die Kraft P ein wenig grösser als das halbe Gewicht der Last Q , so wird letztere gehoben; führt man aber das Seil, an welchem die bewegliche Rolle C hängt, über eine feste Rolle D und lässt an seinem anderen Ende ein Gewicht $P > \frac{1}{2} Q$ als Kraft wirken, so findet man, dass Q stets nur halb so hoch gehoben wird, als P herabsinkt.

Was also an einer beweglichen Rolle an Kraft gewonnen wird, geht am Wege verloren.

Dieser Satz gilt in sinngemässer Weise von allen Maschinen.

Der gewöhnliche Flaschenzug (Fig. 15) besteht aus einer Verbindung von festen mit gleich vielen beweglichen Rollen. Sind die Seile parallel, so bleibt die Grösse der Rollen ausser Betracht; die Kraft ist im Falle des Gleichgewichtes so viel mal kleiner wie die Last, als die Zahl der Rollen beträgt, also $P = \frac{1}{2n} Q$.

Die Last wird nämlich durch so viele gleiche, parallele Kräfte getragen, als Seilstücke, also auch Rollen vorhanden sind. Auf jedes Seilstück, folglich auch auf das freie Seilende, trifft daher der $2n$ te Teil der Last. (Differential-, Potenzflaschenzug.)

Das Rad an der Welle besteht aus einer Rolle, welche mit einem cylindrischen Stabe, der Welle, konzentrisch fest verbunden ist; um die Welle ist ein Seil geschlungen, welches die Last trägt, während die Kraft am Umfange des Rades wirkt.

Wie die feste Rolle lässt sich das Wellrad als ein Hebel betrachten, dessen Stützpunkt der Mittelpunkt des Rades ist und dessen Arme diejenigen Radien R und r der Welle sind, welche zu den Punkten gehören, an denen das Seil Rad und Welle verlässt. Gleichgewicht tritt ein, wenn $P \cdot R = Q \cdot r$ ist, wenn sich also $P : Q = r : R$ verhält.

Am Wellrade verhält sich also im Falle des Gleichgewichtes die Kraft zur Last, wie der Radius der Welle zu dem des Rades.

Zusatz. Bei einigen Maschinen, wie beim Haspel, der Winde u. s. w. sind an Stelle des Rades ein oder mehrere Stäbe radial angebracht.

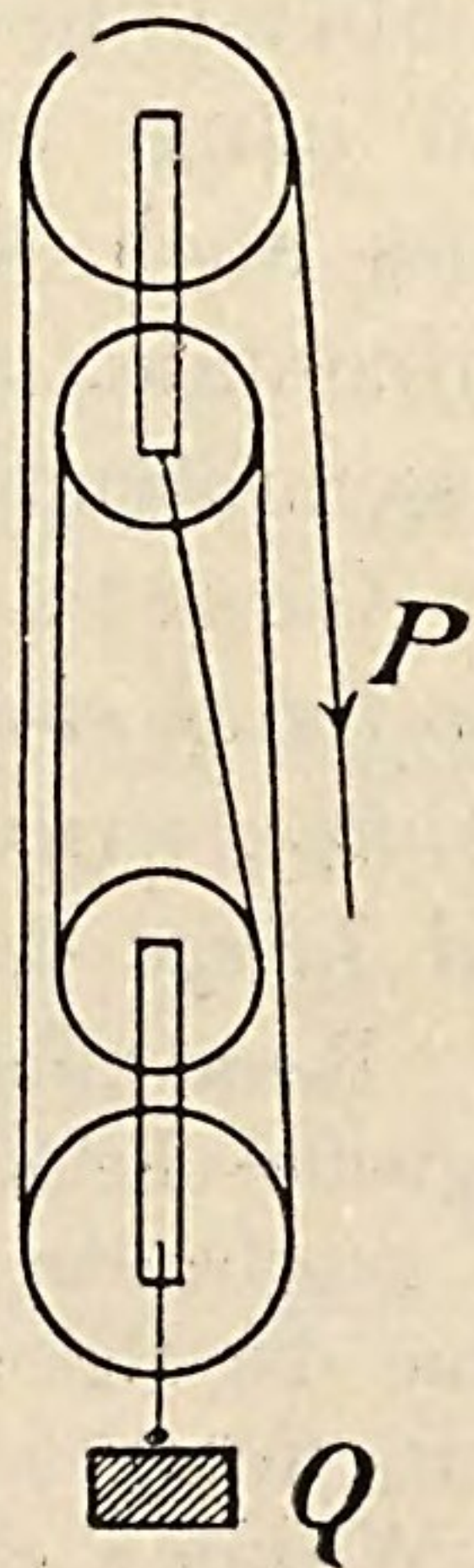


Fig. 15.

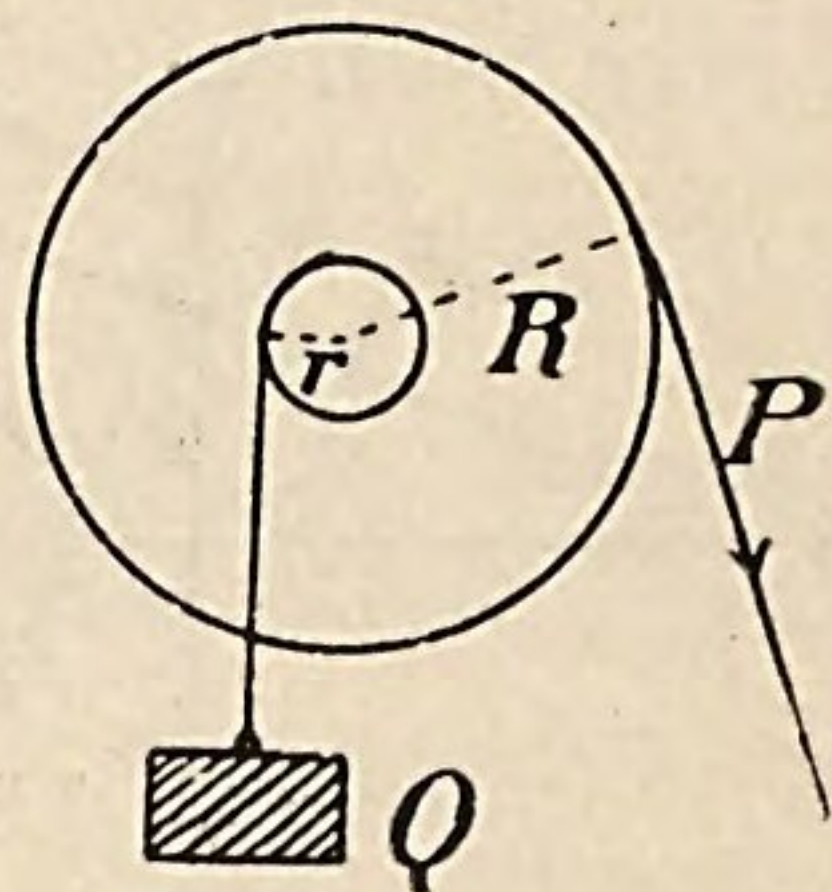


Fig. 16.

31. Die schiefe Ebene. Schraube. Keil.

Jede feste Ebene, welche mit einer horizontalen Ebene einen Winkel bildet, heisst eine schiefe Ebene; die Senkrechte von einem beliebigen Punkte der schiefen auf die horizontale Ebene heisst Höhe der schiefen Ebene, die Senkrechte aus demselben Punkte auf die Schnittlinie der horizontalen mit der schiefen Ebene die Länge der letzteren, die Strecke zwischen den Fusspunkten dieser beiden Senkrechten die Basis der schiefen Ebene.

a) Die Kraft wirkt parallel zur schiefen Ebene.

Versuch. Befestigt man einen auf einer schiefen Ebene liegenden Körper vom Gewichte Q an einem Faden, führt diesen so über eine Rolle, dass er sich parallel zur schiefen Ebene legt und hängt am anderen Ende ein Gewicht P an, so tritt, wie gross auch der Neigungswinkel der schiefen Ebene gegen die horizontale, also ihre Höhe h und ihre Länge l gewählt sein mögen, Gleichgewicht nur dann ein, wenn sich $P:Q = h:l$ verhält.

Gesetz. Eine auf einer schiefen Ebene befindliche Last wird also durch eine parallel zu dieser wirkende Kraft im Gleichgewichte gehalten, wenn sich Kraft und Last zu einander verhalten wie Höhe und Länge der schiefen Ebene.

Bemerkung 1. Bei dem obigen Versuche treten unvermeidliche Begleiterscheinungen auf, welche die unmittelbare Bestimmung von P bei gegebenem Q , h und l unmöglich machen; dazu gehört in erster Linie die Reibung, das heisst der Widerstand, welchen ein Körper erfährt, wenn er sich über einen anderen hinwegbewegt; diese kann aber als Wirkung einer Kraft R angesehen werden, welche der ihn bewegendem Kraft entgegengesetzt ist; deshalb lässt sich jedesmal durch einen Doppelversuch die Kraft P finden, welche abgesehen von der Reibung der Last Q Gleichgewicht hält: Man bestimme nämlich durch vorsichtiges Hinzufügen von Gewichtstücken einerseits dasjenige Gewicht P_1 ,

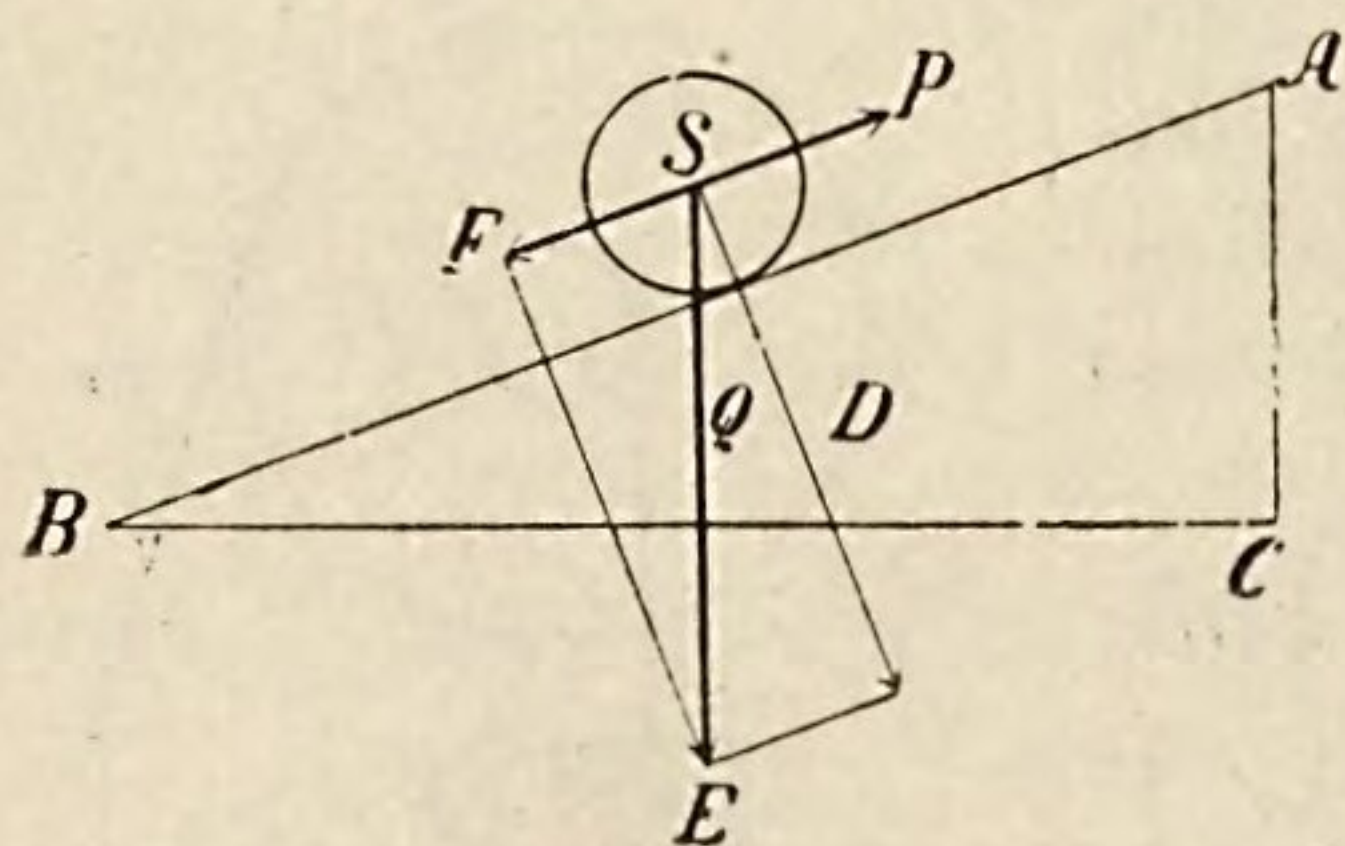


Fig. 17.

welches den Körper eben noch am Hinabrollen über die schiefe Ebene hindert, andererseits das Gewicht P_2 , das ihn gerade über die schiefe Ebene hinaufzöge; dann ist $P_1 = P - R$ und $P_2 = P + R$; also $\frac{1}{2}(P_1 + P_2) = P$.

Bemerkung 2. Die Gleichung $P:Q = h:l$ ist eine notwendige Folge früherer Sätze. Die Last Q , dargestellt durch die lotrechte Strecke SE (Fig. 17),

lässt sich nach 20. ersetzt denken durch zwei Komponenten, von denen die eine senkrecht, die andere parallel zur schiefen Ebene wirkt; erstere

wird durch den Widerstand der festen schiefen Ebene aufgehoben; wirksam bleibt nur die letztere SF . Die Kraft P entgegengesetzt zu SF und dieser gleich hält also der Last Q auf der schiefen Ebene Gleichgewicht. Da aber $\triangle SEF \sim \triangle ABC$, so ist $SF:SE = AC:AB$ oder $P:Q = h:l$.

Anwendungen: Stiege, schiefe Ebene bei Strassen und Eisenbahnen.

b) Die Kraft wirkt parallel zur horizontalen Ebene.

Versuch. Führt man den an der Last Q befestigten Faden so über eine Rolle, dass er durch ein Gewicht P parallel zur horizontalen Ebene gespannt ist, so ergeben den obigen ähnliche Versuche, dass im Gleichgewichtsfall zwischen P , Q , der Höhe h und der Basis b der schiefen Ebene die Gleichung besteht $P:Q = h:b$.

Gesetz. Eine auf einer schiefen Ebene befindliche Last Q wird daher durch eine in horizontaler Richtung wirkende Kraft im Gleichgewichte gehalten, wenn sich Kraft und Last zu einander verhalten, wie Höhe und Basis der schiefen Ebene.

Bemerkung. Auch diese Gleichung ergibt sich aus den früheren Sätzen. Die Last Q , dargestellt durch die lotrechte Strecke SG (Fig. 18) lässt sich durch zwei Komponenten ersetzt denken, von denen die eine senkrecht zur schiefen Ebene wirkend durch den Widerstand derselben aufgehoben wird, so dass nur die andere SH , parallel zur Basis, in Wirkung bleibt. Die Kraft P gleich, aber entgegengesetzt SH stellt Gleichgewicht her. Nun ist $\triangle GSH \sim \triangle BCA$; also $HS:GS = AC:BC$ oder $P:Q = h:b$. —

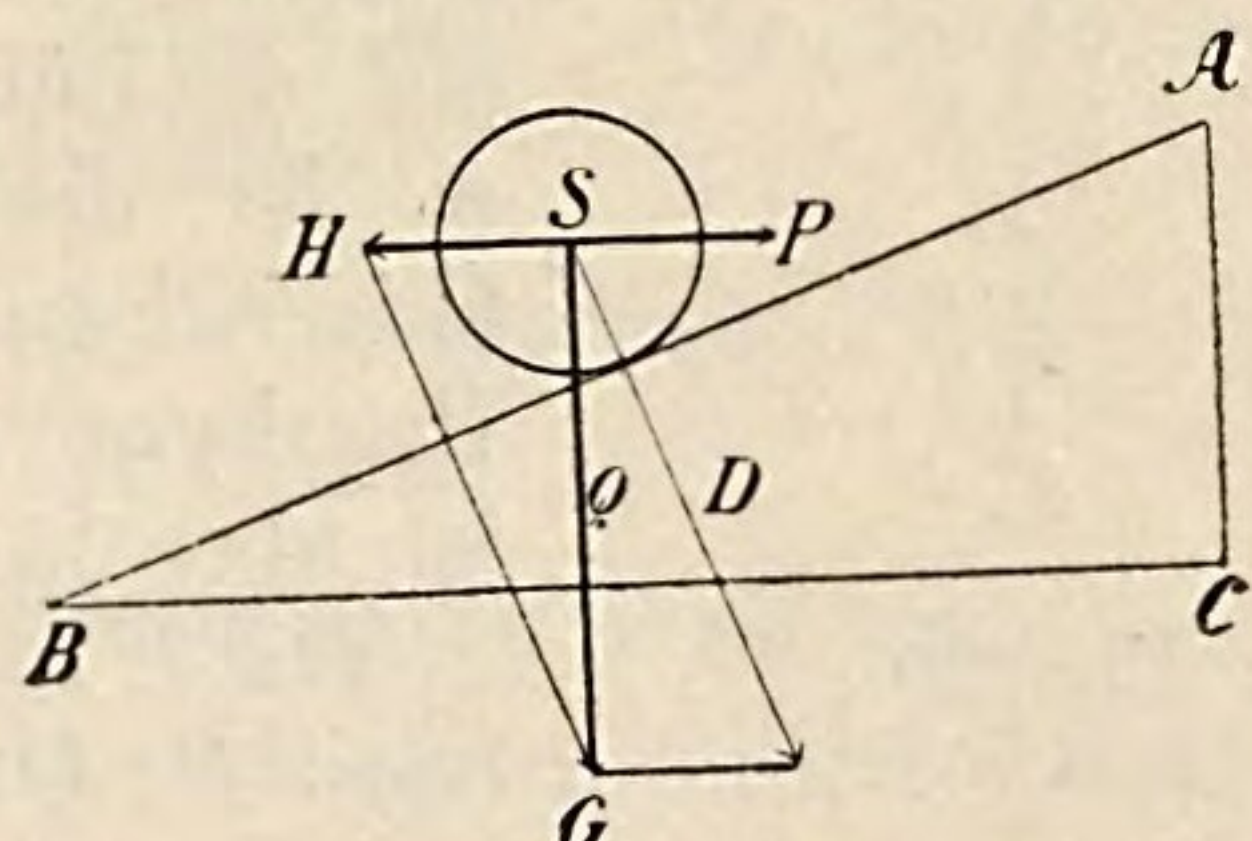


Fig. 18.

Denkt man sich (Fig. 19) ein rechtwinkliges Dreieck ABC , dessen eine Kathete BC gleich dem Umfange eines Cylinders ist, so auf dem Mantel desselben aufgewickelt, dass die andere Kathete AB in die Richtung einer Seitenlinie des Cylinders fällt, so bildet die Hypotenuse dieses Dreiecks eine Windung einer Schraubenlinie; AB heisst Ganghöhe der Schraubenlinie. Wird die Schraubenlinie erhaben aus dem Cylinder herausgearbeitet, so entsteht eine Schraubenspindel oder kurz eine Schraube; diese bewegt sich in der

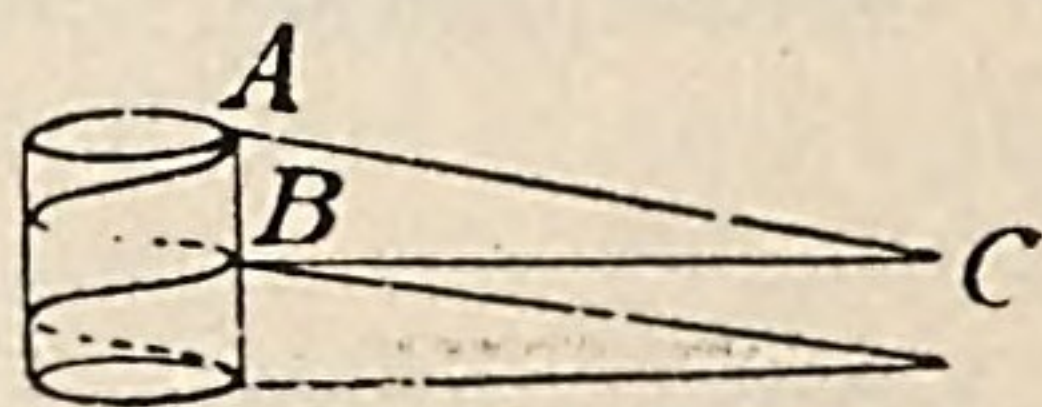


Fig. 19.

Schraubenmutter, einer in einen anderen Körper eingegrabenen schraubenförmigen Vertiefung von gleicher Ganghöhe mit der Schraube.

An einer Schraube wird die Last längs der Schraubenlinie fortbewegt, die Kraft aber wirkt senkrecht zur Ganghöhe. Kraft und Last verhalten sich also bei einer Schraube ebenso, wie bei einer schiefen Ebene, an welcher die Kraft parallel der Basis wirkt.

Soll daher an einer Schraube Gleichgewicht eintreten, so muss sich die Kraft zur Last verhalten, wie die Ganghöhe der Schraube zu ihrem Umfange; also $P:Q = h:u$.

Die Wirkung einer an einer Schraube wirkenden Kraft ist also um so grösser, je grösser der Umfang und je kleiner die Ganghöhe der Schraube ist.

Schraubenpresse. Schraube ohne Ende.

Der Keil ist ein gerades, dreiseitiges Prisma, dessen Grundfläche ein gleichschenkliges Dreieck bildet (Fig. 20); die Grundlinie dieses Dreieckes heisst Breite des Keiles, der Schenkel Länge desselben.

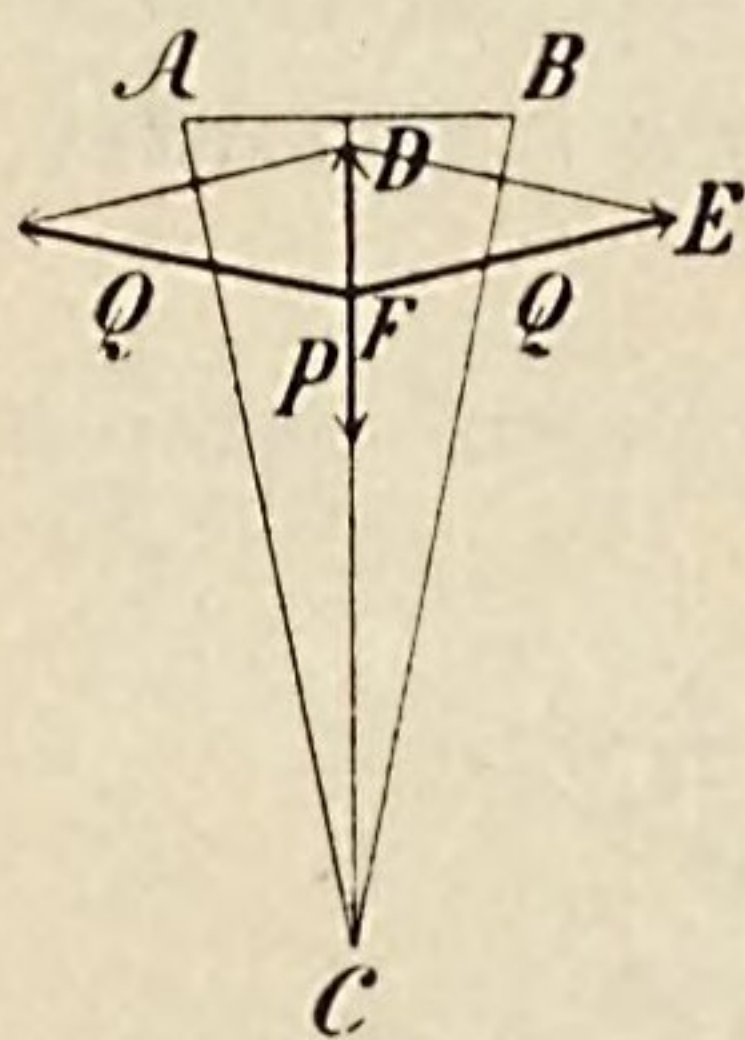


Fig. 20.

Die Kraft wirkt senkrecht zur Breite, die Last aber als Druck des widerstehenden Materiales, in welches der Keil getrieben werden soll, senkrecht auf die Längen des Keiles. Ist das Material homogen, so ist der Druck auf beiden Seiten der gleiche. Gleichgewicht tritt ein, wenn die Kraft P der Resultante der Widerstände Q des Materiales gleich ist, aber in entgegengesetzter Richtung wirkt. Da aber $\triangle DEF \sim \triangle ACB$ ist, so ist $DF:EF = AB:BC$ oder $P:Q = b:l$.

Im Gleichgewichtszustande verhält sich also am Keile die Kraft zur Last wie die Breite des Keiles zu seiner Länge.

Die Wirkung einer Kraft ist daher an einem Keile um so grösser, je kleiner seine Breite im Verhältnisse zu seiner Länge ist.

Anwendungen: Schere, Messer, Beil.

B. Vom Gleichgewichte der Flüssigkeiten. (Hydrostatik.)

32. Gestalt eines flüssigen Körpers. Form seiner Oberfläche.

Gleichgewicht. Zusammendrückbarkeit. Elastizität.

Versuch. Taucht man einen festen Körper, etwa einen Holzstab, in eine Flüssigkeit und zieht ihn wieder heraus, so

bleibt Flüssigkeit an ihm haften; diese sammelt sich an seinem unteren Ende an und fällt dann in Tropfen, welche die Gestalt einer Kugel haben, ab. Öl in ein Gemisch von Wasser und Alkohol gebracht, sammelt sich in Form von Kugeln.

Flüssige Körper haben also im Gleichgewichtszustande bei kleinen Mengen die Gestalt einer Kugel.

Die Teilchen einer Flüssigkeit haben geringe Kohäsion und lassen sich daher durch eine von aussen wirkende Kraft leicht verschieben; so bewirkt die Schwerkraft der Erde eine Trennung der Flüssigkeitsteilchen, die nur durch Sperrung mittelst eines festen Gefässes abgehalten werden kann; in einem solchen ist aber eine Flüssigkeit nur dann im Gleichgewichte, wenn jedes Teilchen derselben dem Erdmittelpunkte so nahe als möglich gekommen ist. Aus diesem Grunde ist die freie Oberfläche einer von einem festen Körper eingeschlossenen, im Gleichgewichtszustande befindlichen Flüssigkeit stets ein Stück einer Kugel- fläche, deren Mittelpunkt der der Erde ist; ist diese Oberfläche klein, so kann sie als wagrechte (horizontale) Ebene betrachtet werden.

Ein flüssiger Körper befindet sich wegen der Verschiebbarkeit seiner Teilchen stets im labilen Gleichgewichte.

Die Lage des Schwerpunktes einer Flüssigkeit hängt von ihrer durch ein Gefäss bestimmten Form ab.

Eine nach allen Seiten gesperrte Flüssigkeit lässt sich durch Druck zusammenpressen; doch ist die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten auch unter hohem Drucke eine sehr geringe. Hört der Druck auf, so nimmt der Körper sehr rasch wieder sein ursprüngliches Volumen ein; flüssige Körper sind daher in hohem Grade elastisch.

Zusatz. Um ebene Flächen horizontal zu stellen, bedient man sich der Wasserwage oder Libelle, einer Röhre, welche bis auf eine Luftblase mit einer Flüssigkeit gefüllt und in eine unten ebene Metallfassung eingesetzt ist. Die Teilchen der Flüssigkeit stellen sich möglichst tief, die Luftblase stets oberhalb der Flüssigkeit ein; die Grundfläche des Instruments kann also nur dann horizontal stehen, wenn die Luftblase genau in der Mitte der Röhre steht.

33. Druck auf die Oberfläche einer allseitig eingeschlossenen Flüssigkeit. Hydraulische Presse.

Versuche. Ein Gefäß, dessen Wand an mehreren Stellen feine Öffnungen besitzt, mündet in eine cylindrische Röhre aus, innerhalb deren sich ein dicht anschliessender Kolben leicht verschieben lässt. Füllt man das Gefäß mit Wasser und übt auf dieses mittelst des Kolbens einen Druck aus, so strömt das Wasser bei allen Öffnungen mit gleicher Stärke heraus.

Ein allseitig geschlossenes Gefäß (Fig. 21), das oben in zwei cylindrische Röhren ausmündet, werde mit einer Flüssigkeit

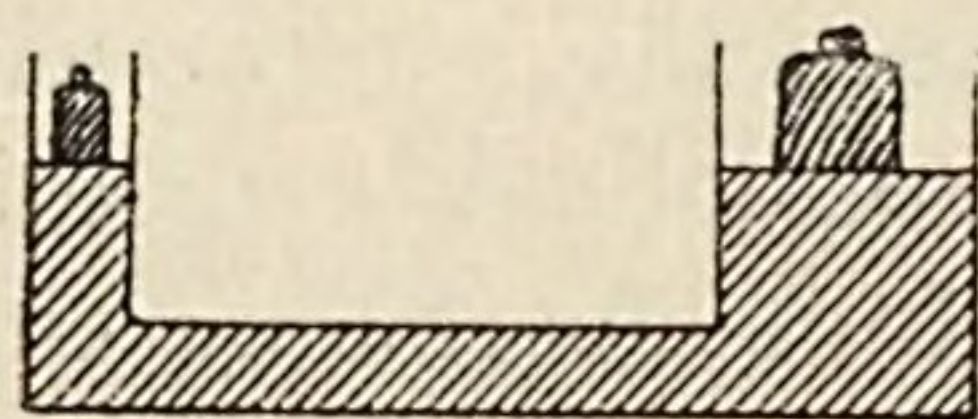


Fig. 21.

gefüllt, so dass diese zum Teile auch noch in den Röhren steht; dann werden auf die Flüssigkeit zwei innerhalb der Röhren leicht verschiebbare, aber dicht anschliessende Kolben aufgesetzt. Belastet man nun den einen Kolben mit einem Gewichte, so wird der andere Kolben

gehoben; um letzteren in seine ursprüngliche Stellung zurückzubringen, muss man auch auf ihn ein Gewicht auflegen. Haben die Kolben, also auch die Röhren gleichen Querschnitt, so sind auch die aufzulegenden Gewichte gleich; sind die Röhren aber ungleich weit, so verhalten sich die aufzulegenden Gewichte gerade so, wie die Querschnitte der Kolben, auf die sie drücken. Daher das

Gesetz: Ein Druck, welcher auf einen Teil der Oberfläche eines flüssigen, allseitig gesperrten Körpers ausgeübt wird, pflanzt sich nach allen Richtungen hin gleichmässig fort; gleiche Flächen erfahren den gleichen Druck; die Drucke, welche ungleiche Flächen erleiden, verhalten sich zu einander wie die Grössen dieser Flächen.

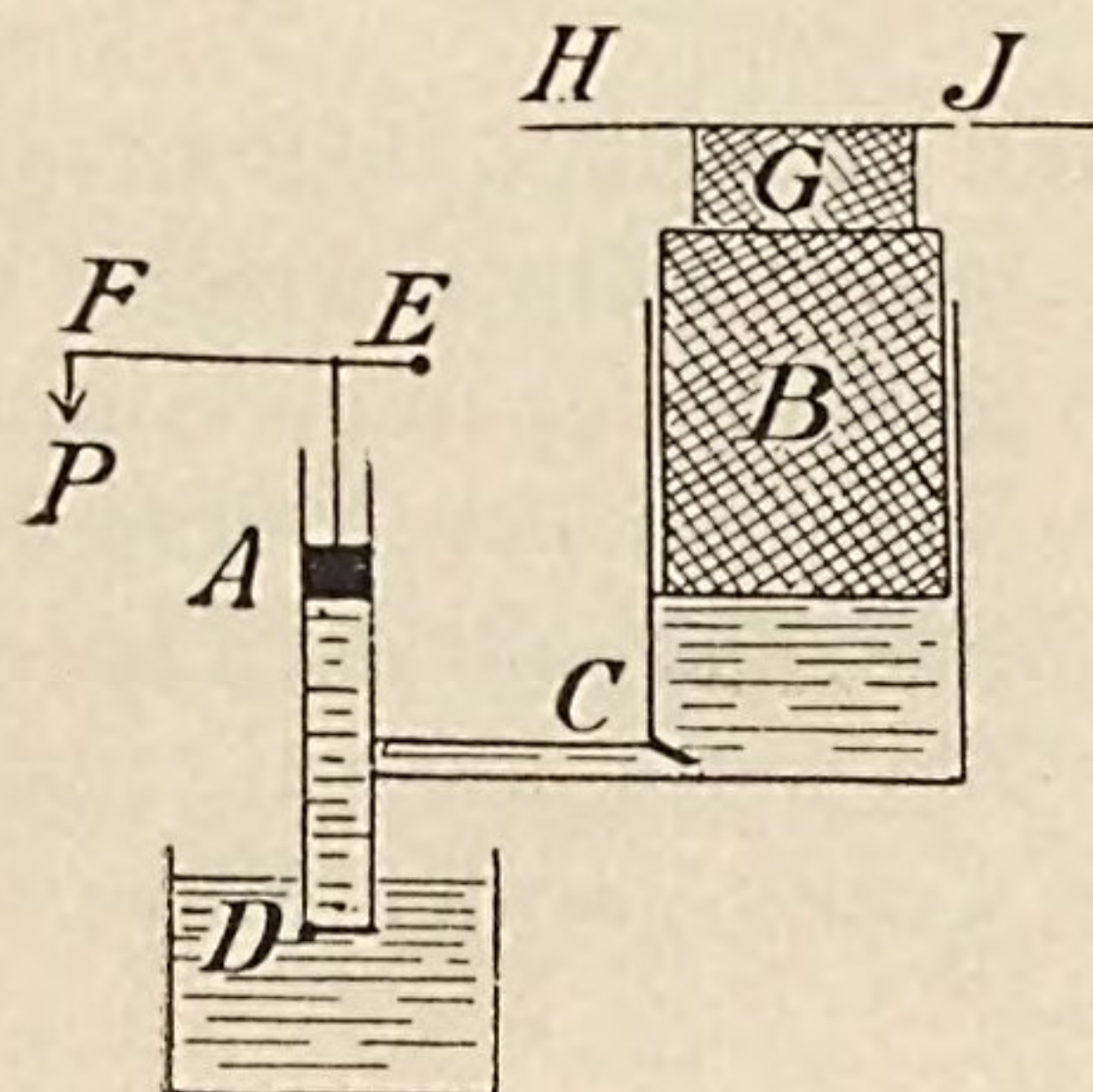


Fig. 22.

Erklären lässt sich dieses Gesetz dadurch, dass an der Oberfläche einer gesperrten Flüssigkeit wegen der leichten Verschiebbarkeit ihrer Teilchen nur dann Gleichgewicht herrschen kann, wenn alle Teilchen unter dem nämlichen Drucke stehen.

Die Wirkung der hydraulischen Presse beruht auf diesem Gesetze. Diese Maschine (Fig. 22) besteht aus zwei ungleich weiten, durch eine Röhre verbundenen Cylindern, innerhalb deren sich dicht anschliessende Kolben

bewegen lassen; Cylinder und Röhre sind mit Wasser gefüllt. Ein Druck, der auf den Kolben A wirkt, pflanzt sich durch das Wasser auf den Kolben B fort und übt auf diesen einen um so grösseren Druck aus, je grösser sein Querschnitt im Vergleich zu dem von A ist. Der selbstwirkende Verschluss (das Ventil) C verhindert eine Rückstauung des Wassers nach Aufhören des Druckes auf A ; durch D kann Wasser in die Cylinder einströmen. Der Kolben A wird mittelst einer Hebelstange EF bewegt; ist an dieser der Kraftarm n mal grösser als der Lastarm und hat der Kolben B einen m mal grösseren Querschnitt wie A , so übt eine in F wirkende Kraft P auf den Kolben B und folglich auf einen zwischen diesem und der festen Platte HI liegenden Gegenstand G einen Druck $n \cdot m \cdot P$ aus. Um aber den Kolben B eine bestimmte Strecke hoch zu heben, muss A dieselbe Strecke m mal zurücklegen.

34. Druck im Inneren einer Flüssigkeit. Bodendruck. Seitendruck.

a) Versuch. An die eine Öffnung eines beiderseits offenen Glaszylinders (Fig. 23) wird eine Platte A mittelst des Stäbchens B fest angedrückt und der Apparat so in Wasser getaucht, dass die Platte horizontal steht; sie fällt nicht ab. Das Wasser übt also auf die Platte einen Druck aus; durch Gewichte, welche auf die mit der Platte in Verbindung stehende Schale C aufgelegt werden können, lässt sich derselbe messen; zu den Gewichten ist aber das der Platte und der Schale zu zählen. Dieser Druck zeigt sich stets ebenso gross als das Gewicht einer Flüssigkeitssäule, welche mit der Platte gleiche Grundfläche und als Höhe ihren Abstand von der Oberfläche der Flüssigkeit hat.

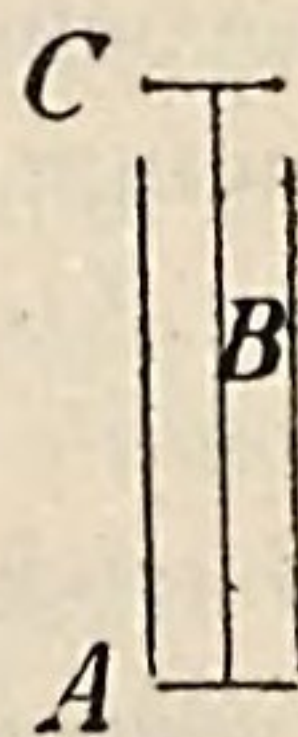


Fig. 23.

Gesetz. Jede im Inneren einer Flüssigkeit befindliche horizontale Fläche erleidet daher von unten einen Druck, welcher dem Gewichte der über ihr stehenden Flüssigkeit gleich ist.

Man nennt diesen Druck den Auftrieb der Flüssigkeit.

Erklären lässt sich der Auftrieb dadurch, dass auch innerhalb einer Flüssigkeit wegen der leichten Verschiebbarkeit der Teilchen nur dann Gleichgewicht bestehen kann, wenn der Druck auf irgend ein Teilchen von allen Seiten der gleiche ist; der von oben auf eine horizontale Fläche wirkende Druck ist aber so gross als das Gewicht der

über ihr stehenden Flüssigkeitssäule; also muss sich von unten her ein ebenso grosser Druck ergeben.

b) Versuche. Gefässe, beiderseits offen, von beliebiger Gestalt, aber mit gleicher Bodenöffnung (Fig. 24), lassen sich auf

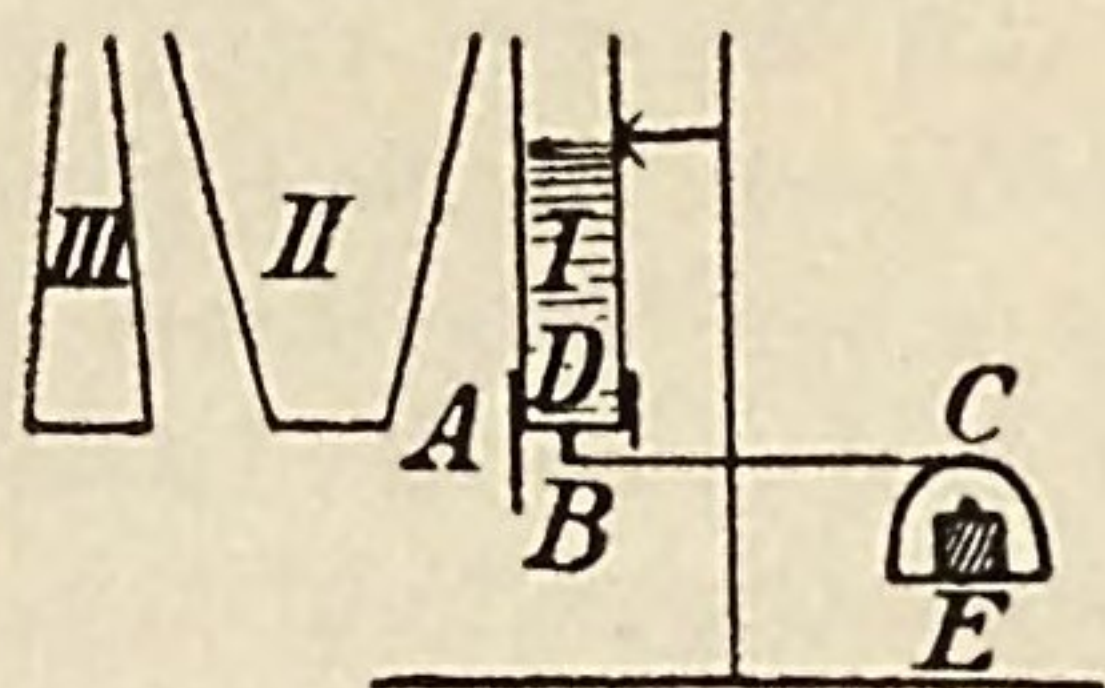


Fig. 24.

einer Metallhülse *A* aufschrauben und durch eine mit Hilfe eines Hebels *BC* angedrückte Platte *D* von unten her dicht abschliessen. Auf die kleine Wagschale *E* lassen sich Gewichte auflegen, welche einer in das cylindrische Gefäss *I* gefüllten Wassermenge von *a* gr Gleichgewicht halten; die

Wassersäule hat eine Höhe von *h* cm. Giesst man mehr Wasser darauf, so öffnet sich die Bodenplatte und es fliesst so viel Wasser ab, bis die Höhe der Wassersäule wieder *h* cm beträgt. Setzt man statt des Gefässes *I* das sich nach oben erweiternde Gefässe *II* auf und füllt es wieder mit *a* gr Wasser, das nun nicht die Höhe *h* erreicht, so kann man noch weiter Wasser zugeben, ohne dass die Bodenplatte sich öffnet; dies geschieht erst, wenn die obige Höhe *h* überschritten wird. In dem sich nach oben verengenden Gefässe *III* würden *a* gr Wasser eine grössere Höhe als *h* cm beanspruchen; aber schon bei dieser Höhe, also bevor die ganze Wassermenge eingegossen ist, beginnt das Wasser unten abzufließen.

Gesetz. Der Druck, welchen eine Flüssigkeit auf die horizontale Bodenfläche eines Gefässes ausübt, ist daher gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche die Bodenfläche des Gefässes und deren Höhe die Höhe der Flüssigkeit ist; er ist also unabhängig von der Gestalt der Seitenwände und unabhängig von der vollen Menge der Flüssigkeit in dem Gefässe.

Erklärung. Für gerade, cylindrische Gefässe, sowie für solche, die sich nach oben erweitern, lässt sich dieses Gesetz durch den Druck, welchen die über der Bodenfläche stehende Flüssigkeit auf diese ausübt, unmittelbar erklären. Verengt sich aber ein Gefäss nach oben, so hat zwar allerdings ein Flächenstück des Bodens unmittelbar nur dann den Druck einer Flüssigkeitssäule von der Höhe der Flüssigkeit zu tragen, wenn diese in ihrer ganzen Höhe über ihr steht; da sich aber in einer Flüssigkeit der Druck nach allen Richtungen hin gleichmässig fortpflanzt, so erleidet jedes gleich grosse Flächenstück des Bodens denselben Druck, auch wenn über ihm die Flüssigkeit nicht in ihrer ganzen Höhe steht. Der Gesamtdruck auf die Bodenfläche ist also auch bei solchen Gefässen so gross wie das Gewicht einer Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche der Gefässboden und deren Höhe die der Flüssigkeit ist.

Aus einem mit einer Flüssigkeit gefüllten Gefässe, dessen Seitenwände mit Ausflussmündungen versehen sind, strömt die Flüssigkeit um so lebhafter heraus, je tiefer die Mündung unter der Flüssigkeitsoberfläche liegt.

Der Druck, welchen eine Flüssigkeit auf die Seitenwände eines Gefässes ausübt, ist auf das gleiche Flächenstück bei gleicher Entfernung von ihrer Oberfläche der gleiche, nimmt aber proportional der Entfernung von der Flüssigkeitsoberfläche zu.

Befindet sich an der Seitenwand eines Gefässes eine Ausflussöffnung, so dass die Flüssigkeit an dieser Stelle auf die Wand keinen Druck mehr ausüben kann, während er an der ihr gegenüberliegenden Stelle wirksam bleibt, so muss das Gefäss, falls es beweglich aufgehängt ist, wegen der Gleichgewichtsstörung in Bewegung kommen. Ein um eine vertikale Achse drehbares Gefäss, an welchem unten horizontale Ansatzröhren angebracht sind, die sämtlich nach derselben Seite hin gerichtete Öffnungen haben, dreht sich daher beim Ausfliessen der Flüssigkeit um seine Achse und zwar in dem der Ausflussrichtung entgegengesetzten Sinne. (Segnersches Wasserrad. Turbinen.)

35. Kommunizierende Röhren.

Mit dem Namen kommunizierende Röhren bezeichnet man Gefässe, welche durch ein, gewöhnlich nahe am Boden einmündendes Rohr so verbunden sind, dass sich die Flüssigkeit aus dem einen in die anderen ergiessen kann.

Im Gleichgewichtszustande steht die nämliche Flüssigkeit in kommunizierenden Röhren überall gleich hoch, mögen die Gefässe gleichen oder ungleichen Querschnitt haben. Befinden sich in kommunizierenden Röhren Flüssigkeiten von ungleichem spezifischen Gewichte, so verhalten sich im Gleichgewichtszustande die Höhen derselben (von der Trennungsfläche aus gerechnet) umgekehrt wie ihre spezifischen Gewichte.

Auch diese Gesetze lassen sich mit Hilfe des Vorhergehenden erklären: Gleichgewicht kann nur dann bestehen, wenn in der horizontalen Trennungsfläche über gleichen Flächenstücken Flüssigkeitssäulen von gleichem Gewichte ruhen. Bei einer Flüssigkeit lässt sich nun jede horizontale Ebene als Trennungsfläche betrachten; der Druck auf irgend ein Flächenstück q in derselben, das h cm unter der Oberfläche liegt, beträgt, wenn s das spezifische Gewicht der Flüssigkeit ist (nach 10. Zus.), qhs Gramm; da nun s überall das gleiche ist und qhs sich nicht ändert, so muss für gleiches q auch h überall gleich sein; das heisst die

Oberfläche der Flüssigkeit ist ebenfalls eine horizontale Ebene. Sind Flüssigkeiten von verschiedenem spezifischen Gewichte s , s' vorhanden und liegt die horizontale Trennungsfläche h cm unter der Oberfläche der einen, h' cm unter der der anderen, so übt die eine Flüssigkeit auf ein Flächenstück q der Trennungsfläche den Druck qhs , die andere auf eine gleich grosse Fläche den Druck $qh's'$ aus; da aber $qhs = qh's'$ ist, so muss sich $h : h' = s' : s$ verhalten. Weite und Gestalt der Gefässe kommen wegen der gleichmässigen Fortpflanzung des Druckes in einer Flüssigkeit bei diesem Gesetze nicht in Betracht.

Kommunizierende Röhren, welche eine Flüssigkeit enthalten, bilden daher ein Instrument, mittelst dessen sich die horizontale Richtung an irgend einem Punkte der Erdoberfläche feststellen lässt; man nennt dieses Instrument die Kanalwage.

Die Mündung einer Quelle oder einer Wasserleitung, sowie der höchste Punkt, bis zu welchem der Strahl eines artesischen oder überhaupt eines Springbrunnens ansteigt, kann dem Gesetze der kommunizierenden Röhren gemäss nicht über dem Niveau liegen, welches die Oberfläche des im Erdinneren, sei es in natürlichen oder in künstlich angelegten Röhren sich sammelnden Wassers bestimmt.

Zusatz. Das Gesetz der kommunizierenden Röhren erleidet eine Ausnahme, wenn diese einen sehr kleinen Querschnitt haben; in sehr engen Röhren (Kapillarröhren) steht nämlich, je nachdem die Adhäsion der Flüssigkeit an die Gefässwände grösser oder kleiner ist, als die Kohäsion der Flüssigkeitsteilchen, die Flüssigkeit höher (z. B. Wasser in Glasröhren) oder tiefer (z. B. Quecksilber in Glasröhren), als sie dem Gesetze der kommunizierenden Röhren entsprechend stehen müsste.

36. Das Archimedische Prinzip.

a) Versuch. Der massive Metallcylinder A (Fig. 25), welcher

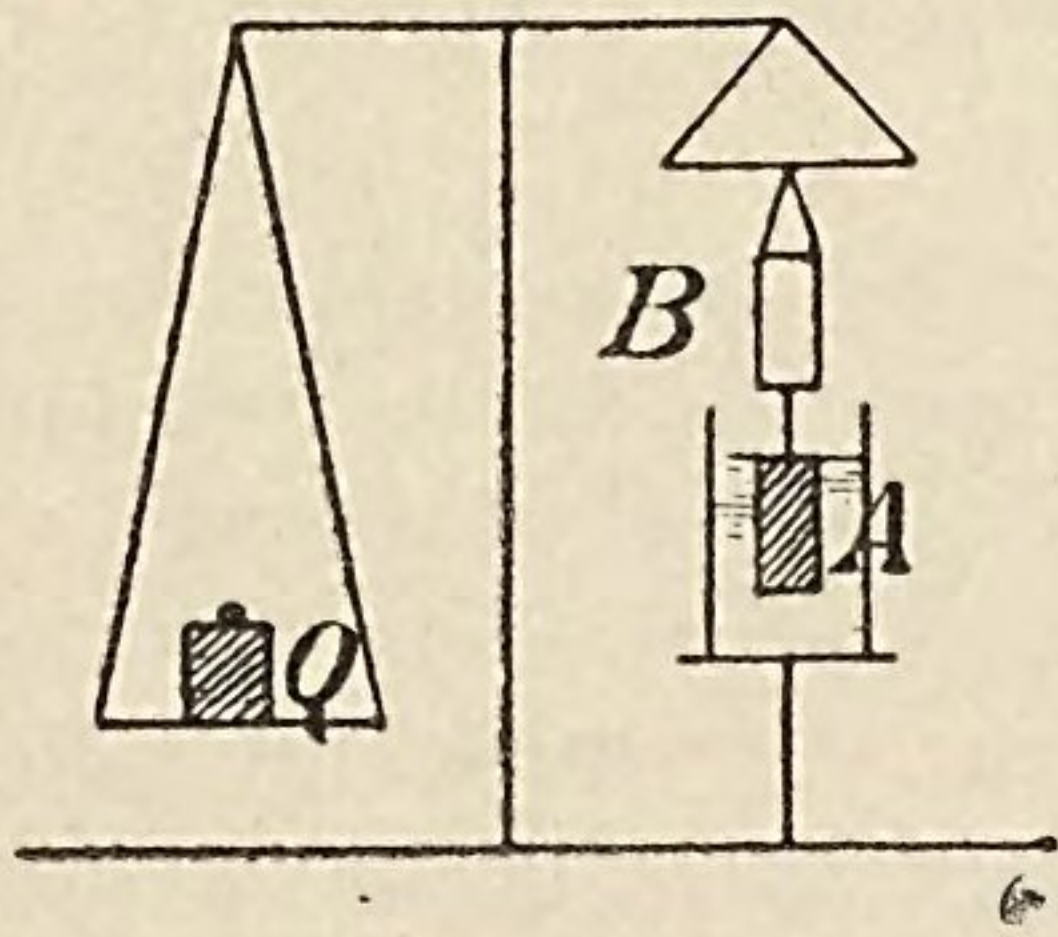


Fig. 25.

genau in den Hohlzylinder B passt, lässt sich an letzterem mittelst eines Häkchens aufhängen und beide miteinander an der kürzeren Wagschale einer sogenannten hydrostatischen Wage. Die beiden Cylinder werden durch ein auf der anderen Wagschale aufgelegtes Gewicht Q im Gleichgewichte gehalten.

Taucht man nun den Cylinder A bis zu seinem oberen Rande in eine Flüssigkeit, so sinkt die Wag-

schale, welche das Gewicht Q trägt; der Cylinder A ist also scheinbar leichter geworden. Füllt man aber den Hohlcylinder B bis oben mit derselben Flüssigkeit, so tritt wieder Gleichgewicht ein. Da nun der Hohlcylinder B gerade so viel Flüssigkeit aufnimmt, als der massive Cylinder A verdrängt, so ergibt sich das

Gesetz: Ein Körper, welcher sich innerhalb einer Flüssigkeit befindet, verliert scheinbar so viel von seinem Gewichte, als die von ihm verdrängte Flüssigkeit wiegt. (Archimedisches Prinzip.)

Erklärung. Dieses Gesetz ist eine notwendige Folge früherer Sätze. Denken wir uns zunächst (Fig. 26) ein gerades Prisma mit der Grundfläche g , der Höhe h und dem spezifischen Gewichte s in einer Flüssigkeit, deren spezifisches Gewicht s' ist, so übt die über der Deckfläche befindliche Flüssigkeitssäule von der Höhe e auf das Prisma einen Druck $P = ges'$ aus; der Auftrieb (siehe 34. a) an der Grundfläche ist $Q = g(h + e)s'$. Das Gewicht $G = g.h.s$, welches der Körper ausserhalb der Flüssigkeit hat, wirkt auch innerhalb derselben als Kraft lotrecht abwärts im Schwerpunkte des Körpers, ebenso der Druck P im Schwerpunkte der Deckfläche, während der Auftrieb Q im Schwerpunkte der Grundfläche lotrecht aufwärts wirkt; da diese drei Punkte in einer Geraden liegen, ist die Resultante $R = G + P - Q = ghs - ghs'$; sie ist also um das Gewicht der von dem Körper verdrängten Flüssigkeit kleiner als das Gewicht des Körpers ausserhalb derselben. Da sich aber jeder Körper in ein Aggregat gerader Prismen mit sehr kleinen Grundflächen zerlegen lässt, so ist diese Entwicklung allgemein giltig.

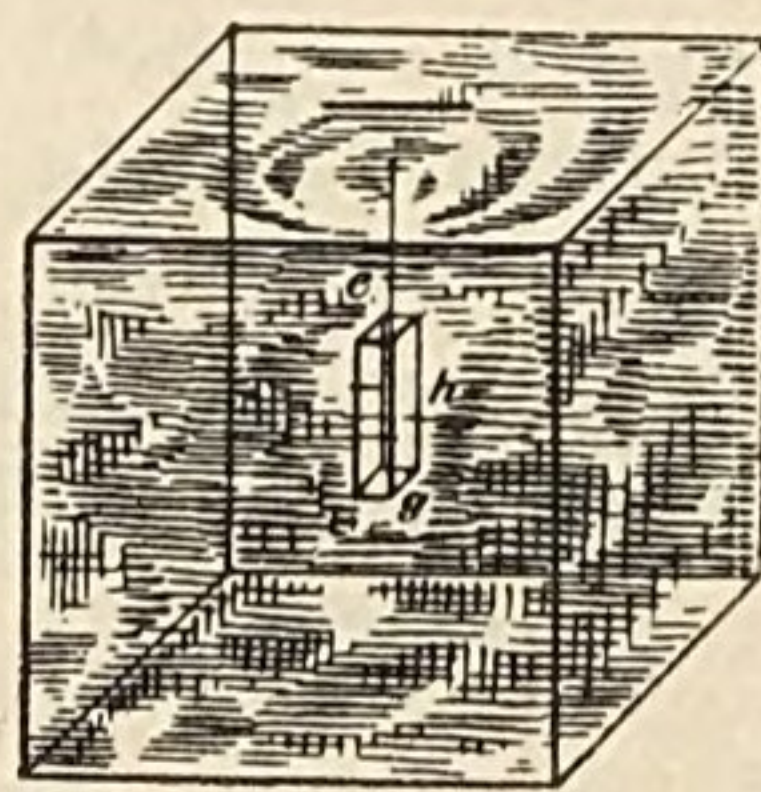


Fig. 26.

b) Versuch. Auf die eine Schale einer Wage stelle man ein mit einer Flüssigkeit gefülltes Gefäss, an der anderen hänge man den obigen Hohlcylinder B an und bringe das Ganze durch Gewichtstücke ins Gleichgewicht. Taucht man nun den massiven Cylinder A bis zu seinem oberen Rande in die im Gefässe befindliche Flüssigkeit, so sinkt die Wagschale, auf welcher sich das Gefäss befindet; Gleichgewicht tritt wieder ein, wenn der Hohlcylinder B bis oben mit der Flüssigkeit gefüllt wird.

Der scheinbare Gewichtsverlust, welchen ein in einer Flüssigkeit befindlicher Körper erleidet, äussert sich also als Druck auf den Boden des Gefässes.

Diese Thatsache findet ihre Erklärung in der Fortpflanzung des Druckes innerhalb einer Flüssigkeit; aus dem Gegendrucke des Gefäss-

bodens auf die Flüssigkeit folgt umgekehrt der scheinbare Gewichtsverlust des Körpers.

37. Schwimmen und Untersinken fester Körper in Flüssigkeiten.

a) *Versuche zeigen, dass ein fester Körper in einer Flüssigkeit untersinkt, wenn er spezifisch schwerer ist, als diese; er ist überall innerhalb der Flüssigkeit im Gleichgewichte, er schwimmt in der Flüssigkeit, wenn sein spezifisches Gewicht dem der Flüssigkeit gleich ist; er taucht aber teilweise aus der Flüssigkeit heraus, er schwimmt auf der Flüssigkeit, wenn er spezifisch leichter ist als diese.*

Diese Sätze sind eine Folge des Gesetzes 36, a; die Resultante der auf einem in einer Flüssigkeit befindlichen Körper wirkenden Kräfte $R = ghs - ghs'$ lässt sich nämlich betrachten als Differenz zwischen dem nach abwärts wirkenden Gewichte ghs des Körpers und dem nach aufwärts wirkenden Auftrieb ghs' der Flüssigkeit; diese Resultante ist aber positiv, d. h. abwärts gerichtet, oder gleich Null oder negativ, d. h. aufwärts wirkend, je nachdem s grösser, gleich oder kleiner als s' ist.

b) *Versuch.* Ein Gefäss, welches eine seitliche Öffnung hat, ist genau bis zu dieser mit einer Flüssigkeit gefüllt; taucht man nun einen Körper, welcher auf dieser Flüssigkeit schwimmt, in dieselbe, so verdrängt er einen Teil der Flüssigkeit, diese steigt im Gefässe und strömt durch die Öffnung ab. Fängt man die verdrängte Flüssigkeit in einem anderen Gefässe auf und bestimmt ihr Gewicht, so findet man, dass dieses ebenso gross ist, als das Gewicht, welches der Körper ausser der Flüssigkeit hat.

Ein auf einer Flüssigkeit schwimmender Körper taucht also in diese so tief ein, dass die von seinem untergetauchten Teile verdrängte Flüssigkeitsmenge ebenso viel wiegt, wie der Körper ausserhalb der Flüssigkeit.

Derselbe Körper sinkt daher in einer Flüssigkeit, welche spezifisch leichter ist, als Wasser, z. B. Alkohol, tiefer, dagegen in einer spezifisch schwereren Flüssigkeit, z. B. in einer Salzlösung, weniger tief ein als in Wasser und zwar so, dass sich die von ihm verdrängten Flüssigkeitsmengen dem Inhalte nach umgekehrt wie die spezifischen Gewichte der Flüssigkeiten verhalten.

Da nämlich das Gewicht der von demselben Körper in verschiedenen Flüssigkeiten verdrängten Volumina stets gleich ist, nämlich nach 37b gleich dem Gewichte G des Körpers, so müssen diese Volumina v , v'

bei ungleichem spezifischen Gewichte s, s' der Flüssigkeiten ungleich sein und zwar muss, weil $G = vs = v's'$ ist, $v : v' = s' : s$ sein.

Zusatz 1. Ein Körper, welcher spezifisch schwerer ist als eine Flüssigkeit, also in ihr untersinken müsste, kann zum Schwimmen gebracht werden, indem man ihn entweder mit einem Körper verbindet, der spezifisch leichter ist als die Flüssigkeit (Korkgürtel) oder indem man durch Aushöhlung seinen Rauminhalt bei gleichbleibendem Gewichte vergrössert. (Schiffe aus Eisen.)

Zusatz 2. Ein Körper, welcher auf einer Flüssigkeit schwimmt, ist im Gleichgewichte, wenn sein Schwerpunkt und der Schwerpunkt der von ihm verdrängten Flüssigkeit lotrecht untereinander liegen. Wird er aus der Gleichgewichtslage gebracht (Fig. 27), so ändert sich im allgemeinen die Menge der verdrängten Flüssigkeit, also auch ihr Schwerpunkt T und der Schwerpunkt S des Körpers nimmt eine andere Lage an; da nun in S das Gewicht des Körpers als Kraft lotrecht abwärts, in T aber der Auftrieb lotrecht aufwärts wirkt, so erfährt der

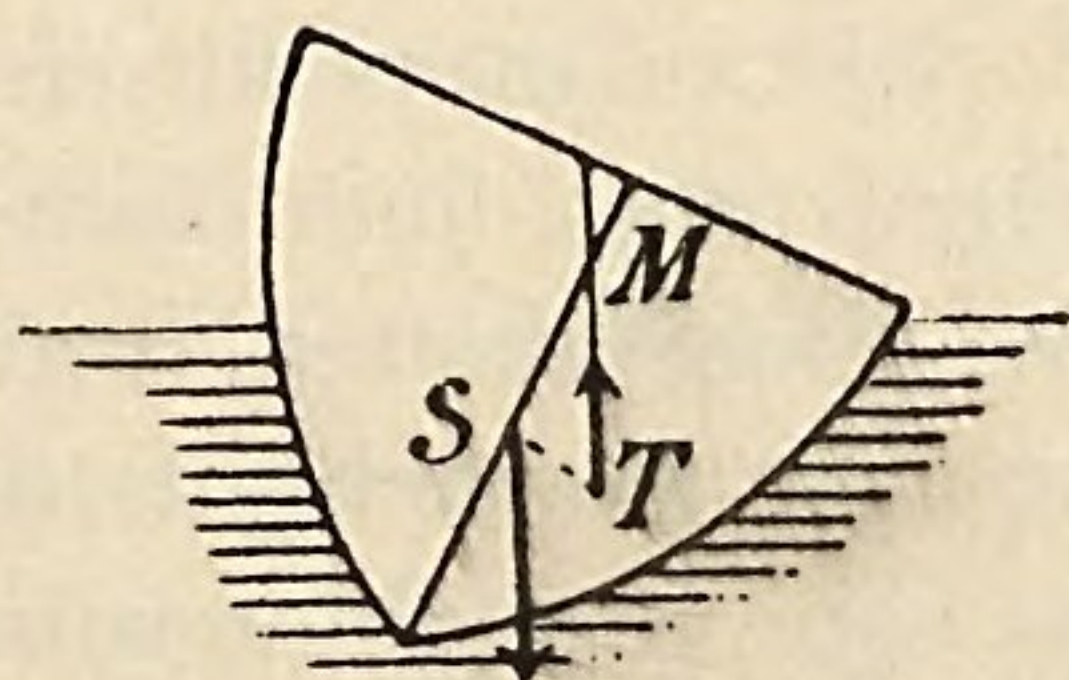


Fig. 27.

Körper eine Drehung und zwar um den Schnittpunkt M des Lotes in T mit der Richtung, welche die ursprüngliche Lotlinie durch S nach der Drehung angenommen hat. Dieser Punkt M heisst das Metazentrum des schwimmenden Körpers. Das Gleichgewicht eines auf einer Flüssigkeit schwimmenden Körpers ist stabil, wenn sein Metazentrum höher, labil, wenn es tiefer liegt als sein Schwerpunkt.

38. Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester und flüssiger Körper.

Auf Grund des Archimedischen Prinzips lässt sich das spezifische Gewicht eines festen Körpers durch zwei Wägungen finden. Man hänge den Körper mittelst eines sehr feinen Drahtes an die eine Schale einer (hydrostatischen) Wage und bestimme sein Gewicht p Gramm ausser Wasser; dann tauche man ihn unter Wasser und wäge ihn wieder; er habe nun q Gramm. Da aber nach 36 sein Gewichtsverlust von $p - q$ Gramm gleich ist dem Gewichte des von ihm verdrängten Wassers, also derjenigen Wassermenge, die mit ihm gleichen

Inhalt halt, so ist (nach 10) der Quotient $p:(p-q)=s$ das spezifische Gewicht des Körpers.

Das spezifische Gewicht eines festen Körpers findet man, indem man sein Gewicht dividiert durch den Gewichtsverlust, welchen er unter Wasser erleidet.

Das spezifische Gewicht eines Körpers, der in Wasser löslich ist, lässt sich dadurch bestimmen, dass man ihn unter einer Flüssigkeit wägt, in der er sich nicht löst und deren spezifisches Gewicht s' bekannt ist. Wiegt er ausser der Flüssigkeit p , unter derselben q Gramm, so ist $p-q$ das Gewicht der Flüssigkeitsmenge, die mit ihm gleiches Volumen hat; er ist also spezifisch $p:(p-q)$ mal schwerer als die Flüssigkeit und da diese s' mal schwerer als Wasser ist, so ist sein spezifisches Gewicht $s = ps' : (p-q)$; ist also σ das spezifische Gewicht eines Körpers in Bezug auf eine Flüssigkeit vom spezifischen Gewichte s' , so ist es in Bezug auf Wasser $s = \sigma \cdot s'$.

Um das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit zu bestimmen, wäge man einen beliebigen, festen Körper, welcher ausserhalb der Flüssigkeit p Gramm wiegt, erst in dieser, dann im Wasser; ist sein Gewicht in der Flüssigkeit q , im Wasser r Gramm, so ist sein Gewichtsverlust in der Flüssigkeit $p-q$, in Wasser $p-r$ Gramm, d. h. die von dem festen Körper verdrängte Flüssigkeit wiegt $p-q$, die von demselben Körper verdrängte, also gleich grosse Wassermenge $p-r$ Gramm; das spezifische Gewicht der Flüssigkeit ist also $s = (p-q):(p-r)$.

Das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit findet man, indem man den Gewichtsverlust, welchen ein fester Körper in derselben erleidet, durch den Gewichtsverlust dividiert, den er unter Wasser erfährt.



Fig. 28.

39. Das Aräometer.

Statt der hydrostatischen Wage bedient man sich zur Bestimmung spezifischer Gewichte häufig der Senkwage oder des Aräometers; dasselbe ist ein hohler Cylinder (Fig. 28), welcher an dem oberen, in eine feine Spindel auslaufenden Ende seiner Achse eine Schale, an dem unteren ein Sieb trägt; der Schwerpunkt des Instrumentes liegt so tief, dass es mit dem Siebe nach unten im Wasser im stabilen Gleichgewichte schwimmt. Auf die obere Schale legt man zunächst so viele Gewichte, dass das Aräometer bis zu einer an der Spindel befindlichen Marke M eintaucht; liegt der feste Körper, dessen spezifisches Gewicht

bestimmt werden soll, auf der Schale, so muss man p Gramm, liegt er im Siebe, also im Wasser, q Gramm aus der Schale wegnehmen, wenn das Aräometer wieder bis M eintauchen soll; also ist p sein Gewicht ausser, $p - q$ sein Gewichtsverlust im Wasser und folglich $s = p : (p - q)$ sein spezifisches Gewicht.

Soll man mit diesem Instrumente das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit bestimmen, so muss sein Gewicht r bekannt sein; muss man nun auf die Schale p Gramm auflegen, wenn das Aräometer in der Flüssigkeit, q Gramm, wenn es im Wasser bis M einsinken soll, so ist das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit $r + p$, das des gleichen Volumens Wasser $r + q$; also ist $s = (r + p) : (r + q)$ (Gewichtsaräometer).

Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Flüssigkeitsgemischen oder von Lösungen fester Körper in flüssigen bedient man sich jedoch meistens des in der Handhabung weit einfacheren Skalenaräometers (Fig. 29), welches lediglich aus einem Hohlcylinder von kleinem Querschnitte besteht; da sein Gewicht unveränderlich ist, so müssen sich die von demselben verdrängten Volumina verschiedener Flüssigkeiten umgekehrt verhalten, wie die spezifischen Gewichte derselben (siehe 37b). Der Punkt, bis zu welchem das Instrument in einer Flüssigkeit einsinkt, welcher also die verdrängte Flüssigkeitsmenge bezeichnet, gibt demnach ihr spezifisches Gewicht an. Der Punkt, bis zu welchem das Instrument in Wasser eintaucht, der also die Wassermenge angibt, welche mit demselben gleiches Gewicht hat, wird gewöhnlich mit 100 bezeichnet; von diesem Punkt aus werden nun Teilstriche so aufgetragen, dass der Zwischenraum zwischen je zweien derselben $0,01$ dieses Volumens beträgt; die Teilstriche sind vom Striche 100 aus nach unten in fallender, nach oben in steigender Reihe nummeriert. Sinkt das Aräometer in einer Flüssigkeit bis zum Teilstriche x ein, so ist ihr spezifisches Gewicht $s = 100 : x$, da $x \cdot s = 100 \cdot 1$ sein muss.

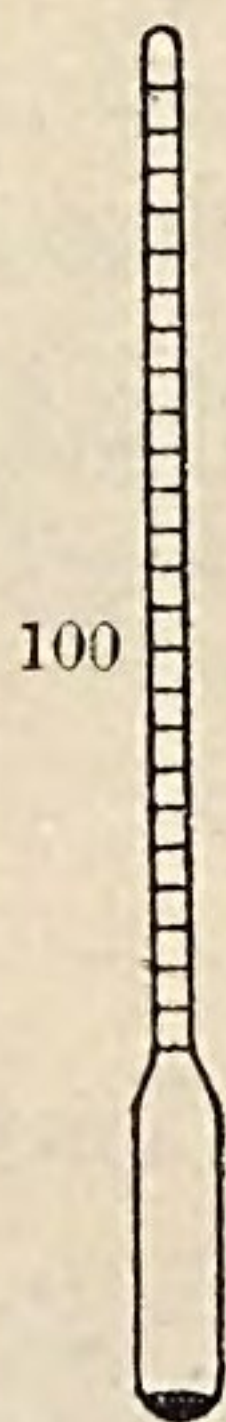


Fig. 29.

Mit einem Skalenaräometer findet man also das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit, indem man die Zahl 100 durch die Zahl dividiert, bis zu welcher das Instrument in der Flüssigkeit einsinkt.

Ein solches Aräometer ist in jeder Flüssigkeit anwendbar; bequemer für den Gebrauch sind aber diejenigen Aräometer,

welche nur für bestimmte Flüssigkeiten gelten (Alkoholometer, Salzspindel, Milch-, Zucker-, Mostwage); auf ihren Skalen sind gewöhnlich die spezifischen Gewichte oder auch die Mischungs- bzw. Lösungsverhältnisse, letztere in Volum- oder Gewichtsprozenten, unmittelbar angeschrieben; die oben angegebene Berechnung wird also bei diesem Instrumente erspart.

Zusatz. Eine dritte, aber nicht auf dem Archimedischen Prinzip beruhende Methode zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Flüssigkeiten ist folgende: Man wägt ein Fläschchen zuerst leer, dann mit der Flüssigkeit und endlich mit Wasser gefüllt; sind die bezüglichen Gewichte p , q , r Gramm, so ist das spezifische Gewicht der Flüssigkeit $s = (q - p) : (r - p)$.

40. Spezifisches Gewicht einiger festen und flüssigen Körper.

Platin	21,5	Diamant	3,5	Quecksilber	13,6
Gold	19,3	Marmor	2,8	Schwefelsäure (100 ⁰ /o)	1,84
Blei	11,3	Gewöhnliches Glas	2,5	Salpetersäure (100 ⁰ /o)	1,50
Silber	10,5	Gips	2,3	Meerwasser	1,03
Kupfer	8,9	Steinsalz	2,3	Öl	0,85—0,95
Nickel	8,9	Schwefel	2,0	Petroleum	0,84
Messing	8,4	Wachs (weiss) . . .	0,97	Alkohol:	
Stahl	7,8	Eis	0,92	100 ⁰ /o	0,794
Schmiedeeisen . . .	7,8	Eichenholz (alt) . .	1,1	80 ⁰ /o	0,848
Gusseisen	7,4	Buchenholz	0,7	60 ⁰ /o	0,895
Zinn	7,3	Tannenholz	0,5	40 ⁰ /o	0,939
Zink	7,1	Kork	0,2	20 ⁰ /o	0,970

C. Vom Gleichgewichte gasförmiger Körper. (Aërostatik.)

41. Schwere, Zusammendrückbarkeit, Spannkraft der Gase.

Druck auf die Gefässwände, Auftrieb in Gasen.

Versuch. Wägt man ein verschliessbares Gefäss einmal, wenn es mit irgend einem Gase, z. B. mit Luft, gefüllt ist und dann, nachdem dieses Gas aus dem Gefässe entfernt ist, so findet man das Gewicht im letzteren Falle stets kleiner als im ersteren.

Die gasförmigen Körper sind also, wie die festen und flüssigen Körper, der Wirkung der Schwerkraft unterworfen.

Ein Liter Luft wiegt (an der Meeresoberfläche bei 0⁰ Celsius) 1,293 g; also ist das spezifische Gewicht der Luft in Bezug auf Wasser 0,001293.

Versuch. Übt man auf ein Gas, das sich in einem allerseits geschlossenen Cylinder befindet, mittelst eines Kolbens einen

Druck aus, so lässt sich dasselbe in hohem Grade zusammendrücken; lässt aber der äussere Druck auf den Kolben nach, so schiebt ihn das Gas wieder zurück.

Ein Pfropfen, welcher an der einen Öffnung eines mit Luft gefüllten Rohres fest eingepresst ist, wird durch Druck auf einen in der anderen Öffnung befindlichen Kolben mit grosser Gewalt hinausgetrieben. (Knallbüchse.)

Gase lassen sich bedeutend zusammendrücken; sie sind sehr elastisch; ihre Teilchen besitzen aber nicht nur keine Kohäsion, sondern stossen sich im Gegenteile ab; ein Gas sucht sich daher stets auszudehnen, füllt das Gefäss, in dem es sich befindet, vollständig aus und übt dabei auf die Gefässwände einen Druck aus, welchen man die Spannkraft des Gases nennt.

Wegen der leichten Verschiebbarkeit eines Gases ist *der Druck, welchen ein Stück der Gefässwand*, sei es durch die eigene Spannkraft eines Gases, sei es durch einen an einer beliebigen anderen Stelle auf das Gas ausgeübten Druck infolge der Fortpflanzung desselben *erfährt, der Grösse dieses Stückes proportional.*

Da die Gase, wie die Flüssigkeiten, schwer und elastisch sind, *muss jede im Inneren eines Gases befindliche horizontale Fläche von unten her einen Druck erleiden, welcher dem Gewichte der über ihr stehenden Gassäule gleich ist.* Man nennt diesen Druck *Auftrieb* oder *Steigkraft* des Gases.

42. Messung des Luftdruckes. Das Barometer.

a) Versuch. Füllt man eine Röhre von etwa 80 cm Länge, deren eines Ende verschlossen ist, bis zum Rande mit Quecksilber, deckt das offene Ende zu, stürzt die Röhre und öffnet das gedeckte Ende unter Quecksilber, so bleibt das Quecksilber in der Röhre bis zu einer bestimmten Höhe über dem äusseren Quecksilberspiegel stehen; über der Quecksilbersäule in der Röhre aber entsteht ein luftleerer Raum, welchen man nach dem italienischen Physiker Toricelli (1608—1647), der diese Erscheinung zuerst beobachtete, die *Toricellische Leere* nennt.

Erklärung. Der Grund dieser Erscheinung liegt darin, dass der Druck, welchen die Schwere der Luft auf die Oberfläche des ausserhalb der Röhre befindlichen Quecksilbers ausübt, sich innerhalb desselben fortpflanzt, also auch auf das Quecksilber in der Röhre durch ihr offenes Ende von unten her wirkt, während die Luft am oberen Ende der Röhre auf das Quecksilber nicht drücken kann.

Das Gewicht der in der Röhre oberhalb des äusseren Quecksilberspiegels befindlichen Quecksilbersäule ist also ein Mass für den Druck, welchen die Schwere der Luft auf eine horizontale Fläche ausübt, deren Grösse dem Querschnitte der Röhre gleich ist. Ebenso gut kann aber die Höhe dieser Quecksilbersäule, da sie dem Gewichte derselben proportional ist, als Mass für den Druck der Luft genommen werden.

In Röhren von verschiedenem Querschnitte steht das Quecksilber gleich hoch, weil der Druck der Luft, also auch das Gewicht der von ihr gehobenen Quecksilbersäule proportional mit der gedrückten Fläche, d. h. mit dem Querschnitte der Röhre wächst; nur in sehr engen Röhren ist die Höhe des Quecksilbers wegen der Depression, welche dieses in Glas erleidet (35. Zus.), zu klein.

Die Höhe der Quecksilbersäule beträgt (bei 0°C. an der Meeresoberfläche im Durchschnitte) 760 mm; also übt die Luft auf jedes Quadratcentimeter Oberfläche einen Druck von $76 \cdot 13,6 \text{ gr} = 1,033 \text{ kgr}$ aus; man nennt diesen Druck einen Atmosphärendruck oder kurz eine Atmosphäre. Die Höhen, bis zu welchen Flüssigkeiten in geschlossenen Röhren durch den Luftdruck gehoben werden, verhalten sich entsprechend dem Principe der kommunizierenden Röhren (35), umgekehrt wie ihre spezifischen Gewichte. Die Steighöhe des Wassers beträgt demnach $76 \cdot 13,6 \text{ cm} = 10,34 \text{ m}$.

b) Bestätigende Versuche: Füllt man eine Röhre wie oben, aber mit Wasser und öffnet sie unter Wasser, so entsteht in der Röhre die Toricellische Leere nicht. Aus einem Glase, das bis zum Rande mit Wasser gefüllt, mit einem Stückchen Musselin zugebunden und dann rasch gestürzt wird, fällt das Wasser nicht heraus.

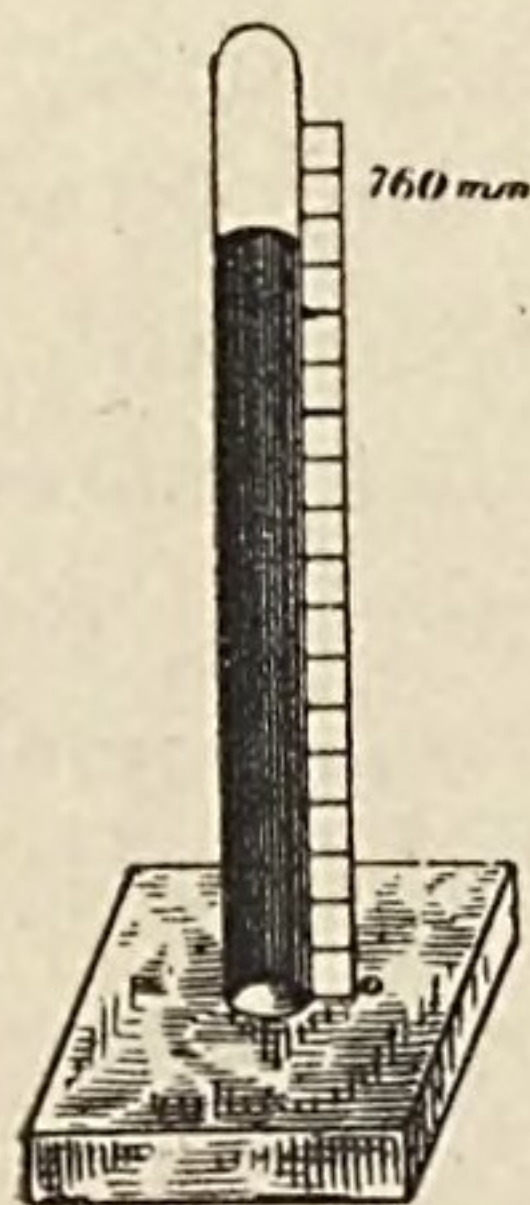


Fig. 30.

Barometer heisst jeder Apparat, mittelst dessen sich der Luftdruck messen lässt; den oben (Versuch 42a) angegebenen Apparat nennt man ein Gefässbarometer (Fig. 30); die Höhe der Quecksilbersäule wird an einem in mm getheilten Massstabe abgelesen, der sich neben der Röhre befindet und so verschoben werden kann, dass sein Nullpunkt an der Oberfläche des ausserhalb der Röhre befindlichen Quecksilbers liegt.

Eine andere Form desselben, welche weniger Quecksilber erfordert, ist das Heberbarometer (Fig. 31), dessen Röhre in allen Teilen gleich weit, an einem Ende geschlossen, am anderen aber offen und U-förmig gebogen ist; die Röhre darf auch etwas enger sein, weil die Kapillardepressionen an den beiden Hauben der Quecksilbersäule gleich sind, also den Abstand der beiden Hauben nicht ändern; neben der Röhre wird ein Massstab gewöhnlich so eingestellt, dass sein Nullpunkt sich neben der unteren Haube befindet.



Fig. 31.

Dagegen ist unser gewöhnliches sogenanntes Wetterglas zu genauen Messungen untauglich, weil der Quecksilberspiegel in dem offenen, gewöhnlich birnförmigen Gefässe und damit der Nullpunkt der Zählung sich ändert, während die Skala neben der Röhre fest angemacht ist.

Die sogenannten Metallbarometer beruhen auf dem Prinzip, dass der Druck der Luft eine metallische Röhre oder Platte von geringer Dicke und grosser Elastizität je nach seiner Grösse mehr oder minder krümmt oder biegt; diese Krümmung oder Biegung wird mittelst eines Hebelapparates an einem beweglichen Zeiger sichtbar gemacht. Die Skala wird bei diesen Apparaten durch Vergleichung mit einem Quecksilberbarometer hergestellt.

Die Metallbarometer von Bourdon (Fig. 32) enthalten eine luftleere, cylindrische, kreisförmig gebogene Röhre, deren eines Ende sich gegen einen festen Widerstand stemmt, während das andere, frei bewegliche Ende jeder durch den Luftdruck hervorgerufenen Krümmung Folge leisten kann. Vidi benützt bei seinem Aneroid- oder Holosterikbarometer eine luftleere, auf einer Seite mit einer dünnen Metallplatte verschlossene Dose; die Metallplatte wird in die Dose um so mehr hineingedrückt, je grösser der Luftdruck ist.

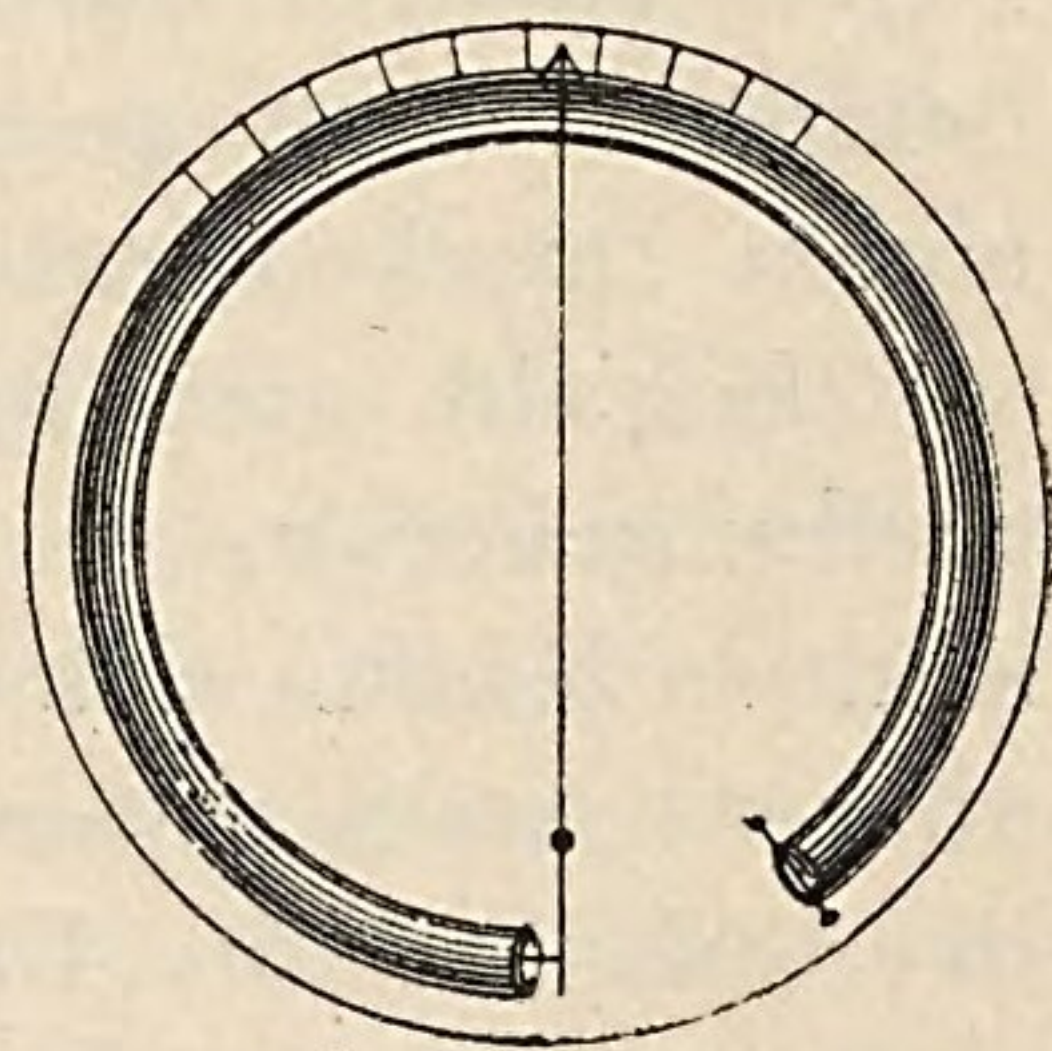


Fig. 32.

43. Das Mariottesche (Boylesche) Gesetz. Das Manometer.

Vorrichtung. Zwei Glasröhren, von denen die eine *A* (Fig. 33) oben stets offen, die andere *B* aber durch einen Hahn *H* luftdicht abgeschlossen werden kann, sind an ihrem unteren

Ende durch einen längeren Gummischlauch S gleichfalls luftdicht verbunden und an kleinen Schlitten befestigt, die sich an einem mit einem Massstabe C versehenen, lotrecht stehenden Stative verschieben, sowie an beliebigen Punkten festklemmen lassen. Röhren und Schlauch sind soweit mit Quecksilber gefüllt, dass dieses in ersteren beobachtet werden kann.

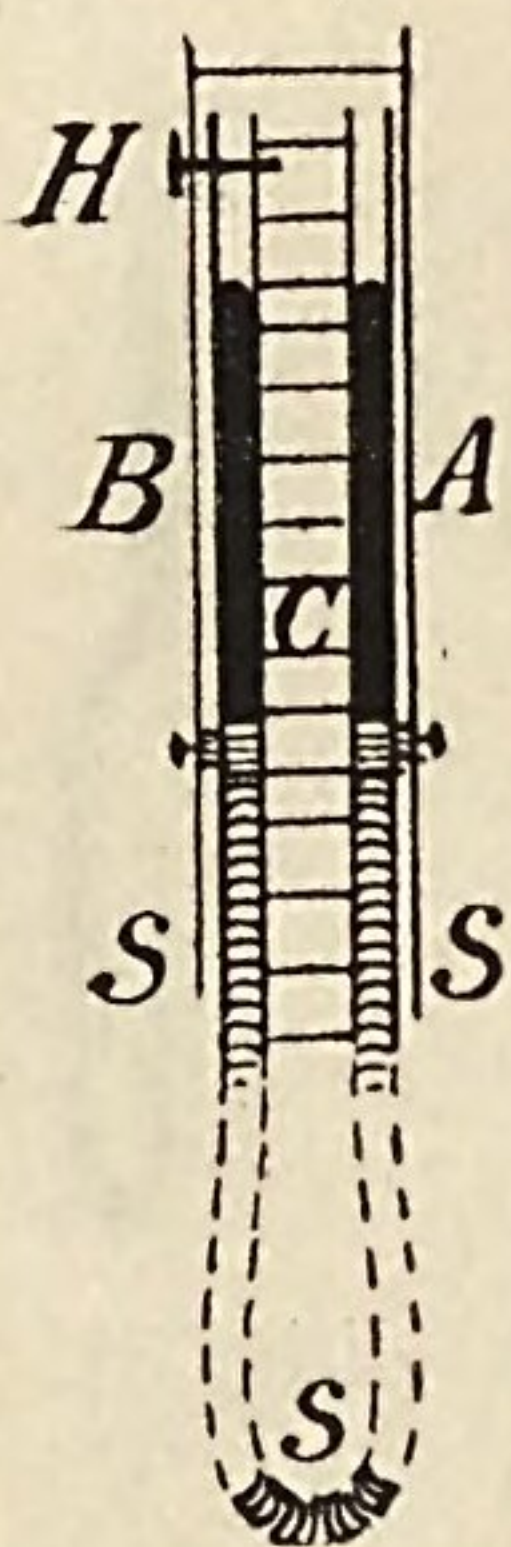


Fig. 33.

Versuch. Bei offener Röhre B werden nun zunächst diese und Röhre A so eingestellt, dass das Quecksilber nach dem Principe der kommunizierenden Röhren beiderseits gleich hoch steht; dann wird der Hahn an B geschlossen, so dass in dieser Röhre über dem Quecksilber eine Luftsäule abgesperrt ist, deren Höhe h an dem Massstabe abgelesen werden kann und die offenbar unter dem durch den Barometerstand p gemessenen Luftdrucke steht. Schiebt man nun Röhre A in die Höhe, so steigt auch das Quecksilber in B ; die Luftsäule in B wird also auf ein kleineres Volumen zusammengedrückt, dessen Höhe nur mehr h' beträgt; der Druck, unter dem sie steht, ist aber grösser geworden; denn sie muss, da die Röhre B geschlossen ist, nun sowohl dem Drucke der Luft, der auf das Quecksilber in A wirkt, als auch dem Drucke der Quecksilbersäule Gleichgewicht halten, um welche dieses in A höher steht, als in B ; der letztere Druck ist aber durch den Abstand q' der Quecksilbersäulen in beiden Röhren gemessen; also steht die Luftsäule nun unter einem Drucke, dessen Mass die Zahl $p' = p + q'$ ist.

Schiebt man ferner die Röhre A unter die ursprüngliche Stellung herab, so sinkt auch das Quecksilber in B ; die Luftsäule in B kann sich also ausdehnen, ihre Höhe h'' ist grösser als h ; aber sie steht unter einem Drucke, der kleiner ist als p ; denn der Luftdruck in A muss nun nicht bloss der Luftsäule, sondern auch der Quecksilbersäule in B Gleichgewicht halten, um welche dieses in B höher steht als in A ; da aber der Druck der letzteren durch ihre Höhe q'' gemessen ist, so steht die Luftsäule unter dem Drucke $p'' = p - q''$.

Wie aber auch die Röhre A bei geschlossener Röhre B stehen mag, stets ergibt sich, dass zwischen irgend zwei Höhen h' , h'' der abgesperrten Luftsäule und den Drucken p' , p'' , unter denen sie sich jeweils befindet, die Gleichung besteht $h' : h'' = p'' : p'$;

da aber die zu diesen Höhen gehörigen Volumina v' , v'' der Luftsäule diesen Höhen bezw. proportional sind, so ist auch $v':v''=p'':p'$. Daher das Gesetz:

Die Volumina einer Gasmenge verhalten sich (unter sonst gleichen Umständen) umgekehrt wie die Drucke, unter denen sie steht. (Mariottesches oder Boylesches Gesetz.)

Zusatz 1. Die Dichte s' , welche eine Gasmenge vom Volumen v' hat, geht in s'' über, wenn dieselbe Gasmenge das Volumen v'' einnimmt und zwar (nach 10) so, dass $s':s''=v'':v'$ ist; also ist $s':s''=p':p''$.

Die Dichten einer Gasmenge verhalten sich also (unter sonst gleichen Umständen) wie die Drucke, unter denen sie steht.

Zusatz 2. Die Spannkraft eines Gases muss (nach 16) dem Drucke, unter dem es steht, stets gleich sein.

Die Spannkraft einer Gasmenge ist also ihrer Dichte proportional.

Den Druck, unter welchem ein abgesperartes Gas steht, also auch seine Spannkraft, misst man mit Hilfe des Manometers; dasselbe besteht (Fig. 34) aus einer U-förmig gebogenen, teilweise mit einer Flüssigkeit gefüllten Röhre, welche sich im Gleichgewichte befindet, wenn der Druck beiderseits der gleiche ist. Unter dem Drucke einer Atmosphäre steht die Flüssigkeit in beiden Schenkeln gleich hoch; wirkt ein Gas in dem einen Schenkel unter höherem Drucke auf die Flüssigkeit, so muss diese im anderen Schenkel entsprechend steigen; falls dieser oben offen ist, gibt die Niveaudifferenz in beiden Schenkeln unmittelbar ein Mass des Druckes; ist er geschlossen, so wird die abgesperarte Luft dem Mariotteschen Gesetze gemäss zusammengedrückt. Bei vielen Maschinen bedient man sich des Bourdonschen Metall-Manometers, welches auf demselben Prinzipie beruht wie das Metallbarometer (siehe 42).

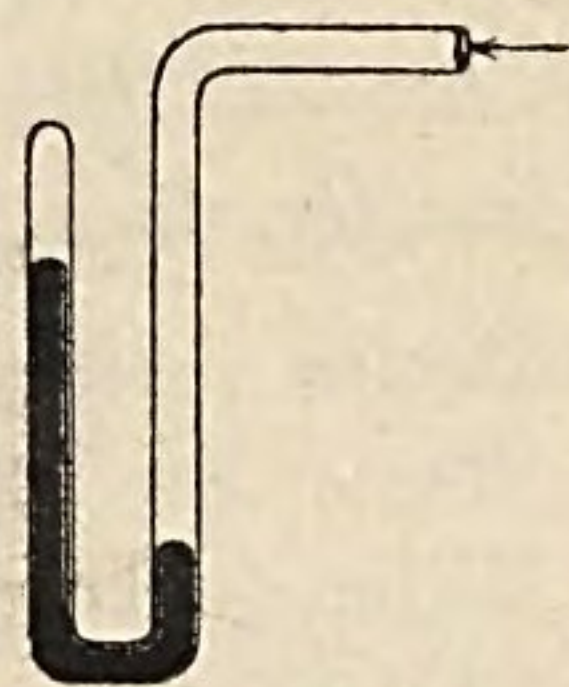


Fig. 34.

44. Barometrische Höhenmessung.

Auf Grund des Mariotteschen Gesetzes lässt sich mit Hilfe des Barometers angeben, wie hoch ein Ort über dem Meeresspiegel liegt.

Man kann sich nämlich eine Luftsäule von beliebigem Querschnitte durch horizontale, je 1 m von einander entfernte Parallelebenen in Schichten von gleichem Inhalte zerlegt denken und darf annehmen,

dass die Dichte der Luft in jeder Schichte überall die gleiche ist, dass sie sich aber von einer Schicht zur nächsten ändert; zwischen den Gewichten g_1, g_2 zweier aufeinander folgenden Schichten und ihrer Dichten s_1, s_2 besteht aber (nach 10.) die Gleichung $g_1 : g_2 = s_1 : s_2$. Nun ist der Luftdruck auf irgend eine dieser Ebenen stets gleich dem Luftdrucke auf die nächst höher liegende Ebene vermehrt um das Gewicht der zwischen diesen Ebenen liegenden Schicht; also lässt sich das Gewicht einer solchen Schicht durch die Differenz der Barometerstände an ihrem unteren und oberen Rande messen; folglich ist $g_1, g_2 = (b_0 - b_1) : (b_1 - b_2)$, wenn b_0, b_1, b_2 die Barometerstände von drei Ebenen bezeichnen, welche die Schichten vom Gewichte g_1, g_2 begrenzen. Nach dem Mariotteschen Gesetze ist aber $b_1 : b_2 = s_1 : s_2$; aus diesen drei Proportionen folgt, dass $b_1 : b_2 = (b_0 - b_1) : (b_1 - b_2)$ und daraus, dass $b_0 : b_1 = b_1 : b_2$ ist; ebenso ist $b_1 : b_2 = b_2 : b_3$ u. s. f.; das heisst, so oft eine Ebene um 1 m höher liegt, nimmt der Luftdruck um den gleichen Quotienten ab. Ist also der Luftdruck am Meeresspiegel b_0 , so beträgt er in einer Höhe von n Metern noch $b_n = b_0 \cdot (b_1 : b_0)^n$; sind daher die Barometerstände b_0, b_1, b_n bekannt, so lässt sich aus dieser Gleichung die Höhe n , welche der Beobachtungsort über dem Meeresspiegel hat, berechnen.

Da nun an der Meeresoberfläche der Luftdruck durch die Höhe einer Quecksilbersäule gemessen $b_0 = 76$ cm beträgt, dem Gewichte einer Luftsäule von 1 m Höhe dort aber (nach 40 u. 41.) eine Quecksilbersäule von $0,1293 : 13,6 = 0,009507$ cm Höhe Gleichgewicht hält, so ist $b_1 = 76 - 0,009507 = 75,990493$, also $b_1 : b_0 = 0,999875$ und folglich $b_n = b_0 \cdot 0,999875^n$, woraus sich $n = 18420$ ($\log b_0 - \log b_n$) ergibt.

In Berlin	beträgt die Meereshöhe	40 m,	der (mittlere) Barometerstand	759 mm
„ Paris	„ „ „	60 „	„	755 „
„ Wien	„ „ „	182 „	„	744 „
„ Würzburg	„ „ „	190 „	„	746 „
„ Erlangen	„ „ „	320 „	„	731 „
„ München	„ „ „	525 „	„	713 „

45. Apparate, deren Wirkung sich durch den Druck der Luft erklären lässt.

1. Der Heber besteht aus einer Röhre, welche die Gestalt einer gebrochenen Linie hat, deren einer Schenkel grösser ist als der andere (Fig. 35).

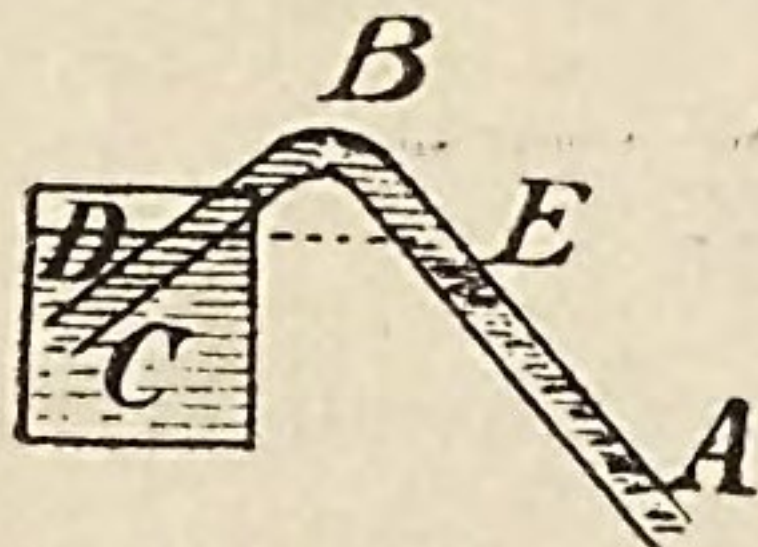


Fig. 35.

Saugt man aus dem längeren Schenkel AB die Luft heraus, während sich die Mündung des kürzeren BC in einer Flüssigkeit befindet, so strömt diese bei A so lange ab, bis die Flüssigkeit unter die Mündung bei C gesunken ist.

Erklärung. Zunächst füllt der Druck der Luft, welcher auf die Oberfläche der Flüssigkeit wirkt, die luftleer gemachte Röhre mit

dieser; ist sie gefüllt, so wirkt dem äusseren Luftdruck im Schenkel BC nur die Flüssigkeitssäule BD , im anderen aber die grössere Flüssigkeitssäule AB entgegen; die Wirkung des Luftdruckes auf die Flüssigkeit in der Röhre ist also bei D um den Druck der Flüssigkeitssäule EA stärker als bei A und folglich wird die Flüssigkeit von D über B nach A gehoben und fliesst hier aus.

2. Der Stechheber (Fig. 36) ist ein Gefäss, das an einer Stelle in ein Röhrchen A mit enger Mündung, an der gegenüberliegenden Stelle aber in einen etwas weiteren Hals B ausläuft. Taucht man denselben unter eine Flüssigkeit, schliesst den Hals mit dem Finger und nimmt ihn dann aus der Flüssigkeit heraus, so bleibt er mit dieser gefüllt; entfernt man nun aber den Finger, so fliesst die Flüssigkeit durch das Röhrchen ab.

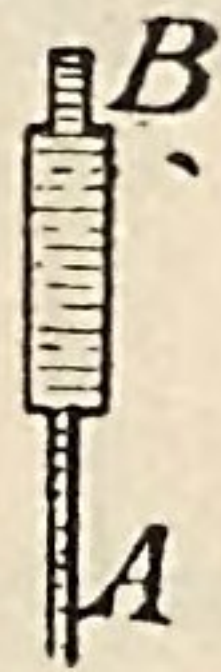


Fig. 36.

Erklärung. Solange der Stechheber mit Flüssigkeit gefüllt und am Halse geschlossen ist, kann die Luft von oben her auf die Flüssigkeit keinen Druck ausüben; deshalb hebt der durch die untere Mündung wirkende Luftdruck die Flüssigkeit. Die Mündung muss enge sein, weil sonst durch dieselbe Luft eindringt, welche in die Höhe steigt und dann das Gefäss durch Druck von oben her entleert.

3. Der Heronsball ist eine Flasche, welche mittelst eines Gummipfropfens, durch den ein Röhrchen gesteckt werden kann, luftdicht verschliessbar ist. Füllt man die Flasche teilweise mit Flüssigkeit, bringt das untere Ende des Röhrchens unter die Oberfläche der letzteren und bläst durch das Röhrchen Luft ein, so spritzt die Flüssigkeit aus dem Röhrchen.

Erklärung. Die Wirkungsweise dieses Apparates findet ihre Erklärung darin, dass die Spannkraft der Luft in der Flasche grösser ist als der äussere Luftdruck.

Die Spritzflasche (Fig. 37) unterscheidet sich vom Heronsball nur dadurch, dass sie zwei Röhrchen hat, das eine zum Einblasen der Luft, das andere als Ausflussröhre für die Flüssigkeit.

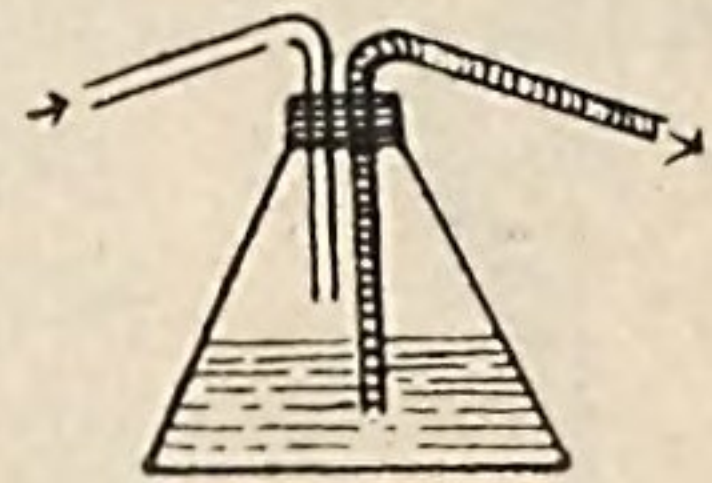


Fig. 37.

Steht das eine Röhrchen eines solchen Apparates A mit einem mit Luft gefüllten Gefäss B in Verbindung und befindet sich die Luft in diesem unter dem Drucke einer Flüssigkeit, so drückt die Spannkraft der Luft in B auf die Flüssigkeit in A und treibt diese bei einer Ausflussröhre hinaus. (Heronbrunnen, Zimmerspringbrunnen.)

4. Die Saugpumpe. In einer Röhre, deren unteres Ende sich in einer Flüssigkeit befindet, lässt sich ein dicht anschliessender Kolben *K* (Fig. 38) auf- und abbewegen; der Kolben ist

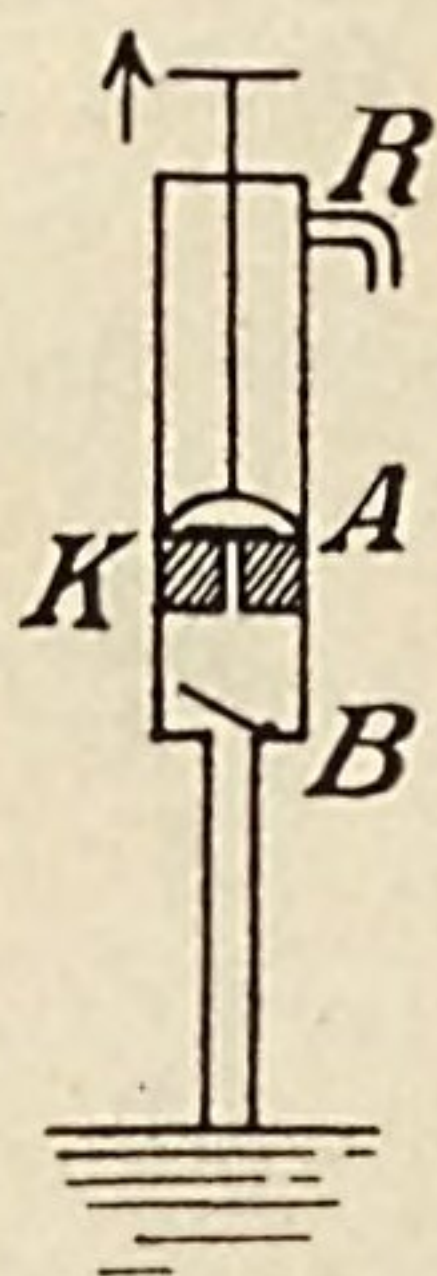


Fig. 38.

durchbohrt, kann aber durch eine Klappe *A* (Ventil) geschlossen werden; auch in der Röhre befindet sich und zwar unterhalb des Kolbens eine Klappe *B*; beide Klappen öffnen sich aufwärts. Wird der Kolben in die Höhe gezogen, so kann sich die zwischen ihm und der Flüssigkeitsoberfläche befindliche Luft ausdehnen; sie verliert also (nach 43, Zus. 1 und 2) an Spannkraft und folglich kann der auf die Flüssigkeitsoberfläche ausserhalb der Röhre wirkende Luftdruck die Flüssigkeit in der Röhre heben. Die Kolbenklappe *A* bleibt geschlossen, weil sie von oben her durch die äussere Luft einen stärkeren Druck erleidet als von unten her, die Röhrenklappe *B* aber öffnet sich, weil auf sie von unten her der grössere Druck wirkt. Geht nun der Kolben herab, so drückt er die Luft unterhalb desselben zusammen; diese schliesst also die Klappe *B*, so dass die gehobene Flüssigkeit unter *B* stehen bleibt, während sie die Klappe *A* öffnet. Bei jedem folgenden Kolbenhube wird die Flüssigkeit in der Röhre höher gehoben, dringt also schliesslich durch die Klappe *B* und den Kolben bei *A* hindurch und kann dann durch eine Röhre *R* ausfliessen, welche seitlich oberhalb der höchsten Stelle angebracht ist, die der Kolben einnehmen kann.

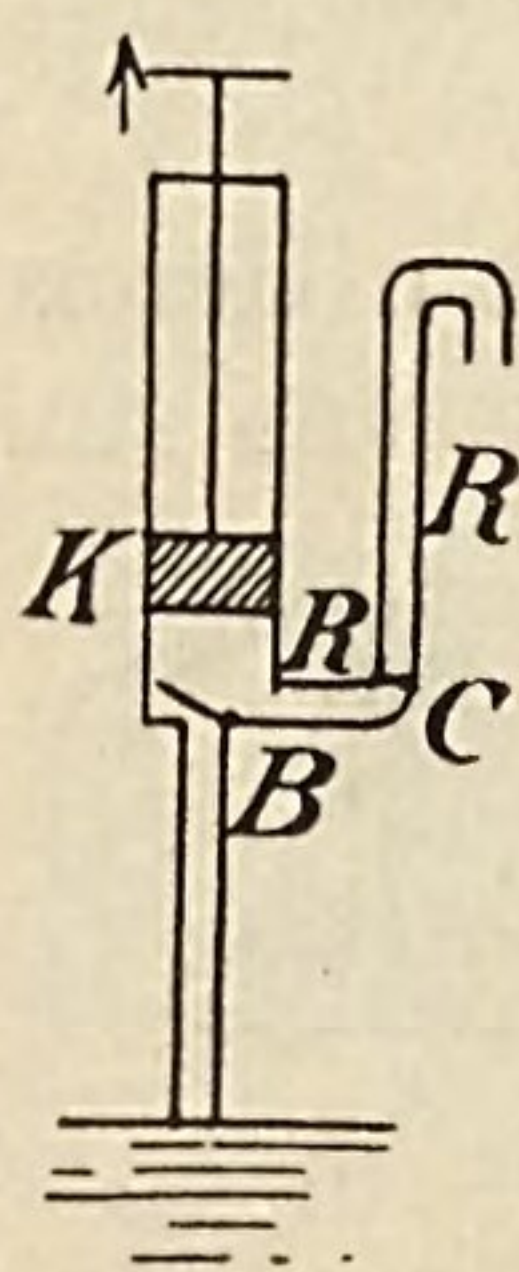


Fig. 39.

5. Die Druckpumpe unterscheidet sich von der Saugpumpe dadurch, dass ihr Kolben nicht durchbohrt ist, dass sich die Ausflussröhre *R* (Fig. 39) unterhalb der tiefsten Stelle befindet, die der Kolben einnehmen kann und dass sich statt der Kolbenklappe in dieser Ausflussröhre eine nach aussen aufschlagende Klappe *C* befindet. Bei jedem Kolbenhube öffnet sich wie bei der Saugpumpe die Röhrenklappe *B*, während die Klappe *C* anfänglich durch den grösseren äusseren Luftdruck, später durch den Druck der darüber stehenden Flüssigkeit geschlossen wird; geht dagegen der Kolben herab, so schliesst sich Klappe *B*, während *C* sich öffnet und die Flüssigkeit abströmen lässt.

Bemerkung. Bei einer Saugpumpe kann eine Flüssigkeit durch die Abflussröhre, die sich nicht zu hoch über dem Kolben befinden darf, lediglich abfliessen, während die Flüssigkeit aus einer Druckpumpe mit um so grösserem Drucke hinausgetrieben wird, je mehr die zwischen Kolben und Flüssigkeit in der Röhre befindliche Luft zusammengepresst wird; Saugpumpen werden deshalb oft als Spritzen benutzt.

6. Die Feuerspritze (Fig. 40) besteht aus zwei Druckpumpen K_1 , K_2 , welche Wasser in einen sogenannten Windkessel W pressen; dieser ist ein Behälter, in dessen Decke eine Röhre R luftdicht so eingefügt ist, dass sie fast bis an den Boden reicht. Das eingepumpte Wasser drückt die Luft im Windkessel zusammen und diese treibt infolge ihrer erhöhten Spannkraft das Wasser unter gleichmässigem Drucke durch die

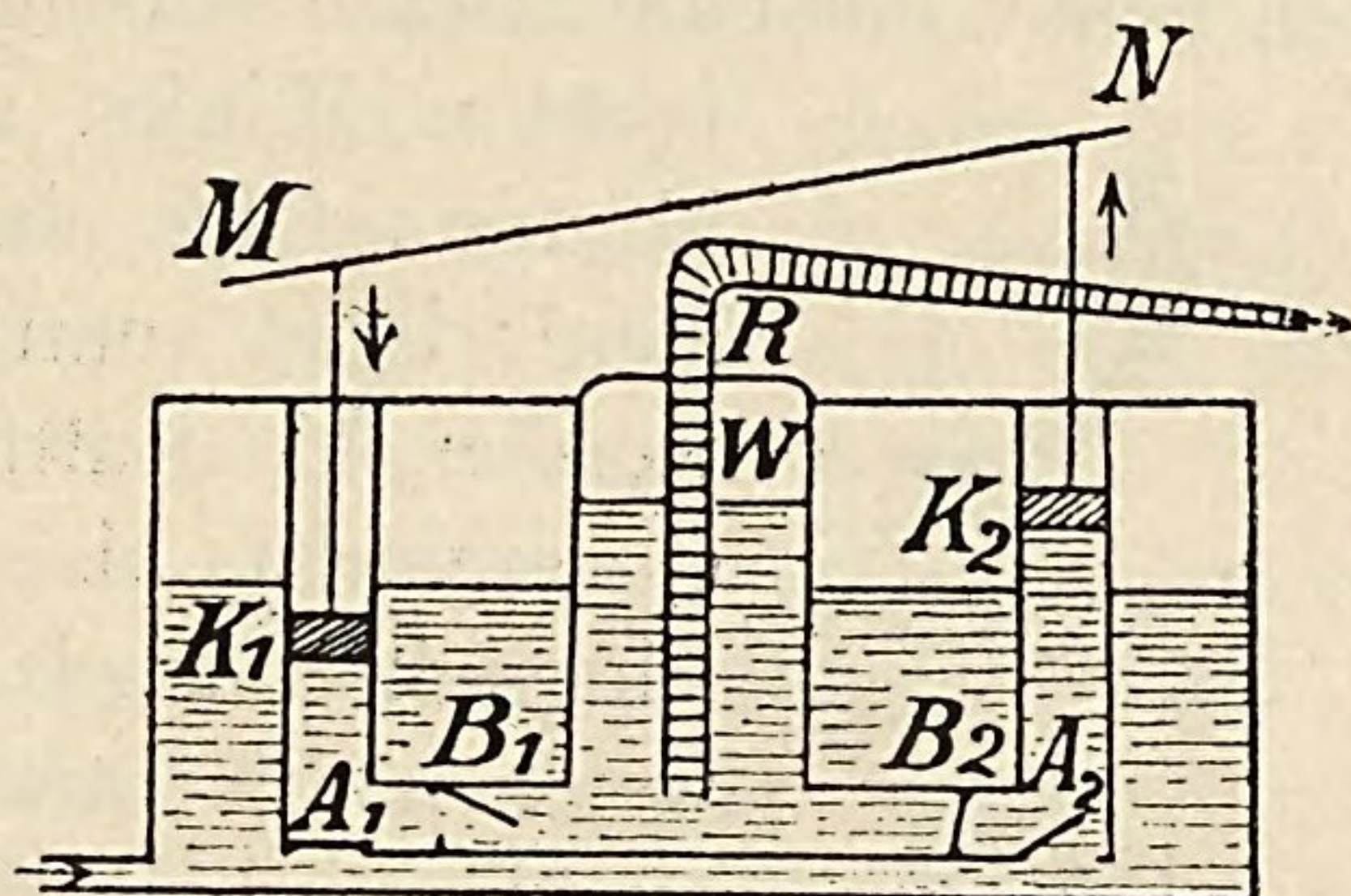


Fig. 40.

Röhre hinaus; der Windkessel bewirkt also, dass das Wasser, welches aus einer Pumpe stossweise getrieben wird, aus der Feuerspritze in einem ununterbrochenen Strahle und unter grösserem Drucke ausströmt. Die Kolben der beiden Pumpen können mittelst einer Hebelstange MN so bewegt werden, dass der eine gehoben wird, wenn der andere herabgeht; die Klappen A_1 und B_2 sind daher geschlossen, wenn A_2 und B_1 geöffnet sind und umgekehrt; die eine Pumpe saugt also immer Wasser in die Spritze, während die andere dasselbe in den Windkessel drückt.

7. Der Blasebalg besteht aus Brettern, welche mittelst eines an ihren Kanten luftdicht befestigten Lederstreifens zu einem Gefässe mit beweglichen Wänden verbunden sind; das eine Brett hat eine Öffnung, welche mittelst einer nach innen aufschlagenden Klappe geschlossen werden kann; durch ein Rohr steht das Innere des Gefässes mit der äusseren Luft in Verbindung. Werden nun die beiden Bretter von einander entfernt, so entsteht im Gefässe Luftverdünnung, die äussere Luft öffnet die Klappe und dringt ein; werden hierauf die Bretter einander genähert, so wird die Luft im Gefässe zusammengepresst, schliesst die Klappe und strömt durch das Rohr aus.

Um einen ununterbrochenen Luftstrom zu erhalten, verbindet man zwei Blasbälge zu einem so, dass sie ein befestigtes, nicht durchbohrtes Brett *A* (Fig. 41) gemeinsam haben, ein Ausflussrohr besitzen und dass der eine Blasebalg sich schliesst, wenn der andere sich öffnet.

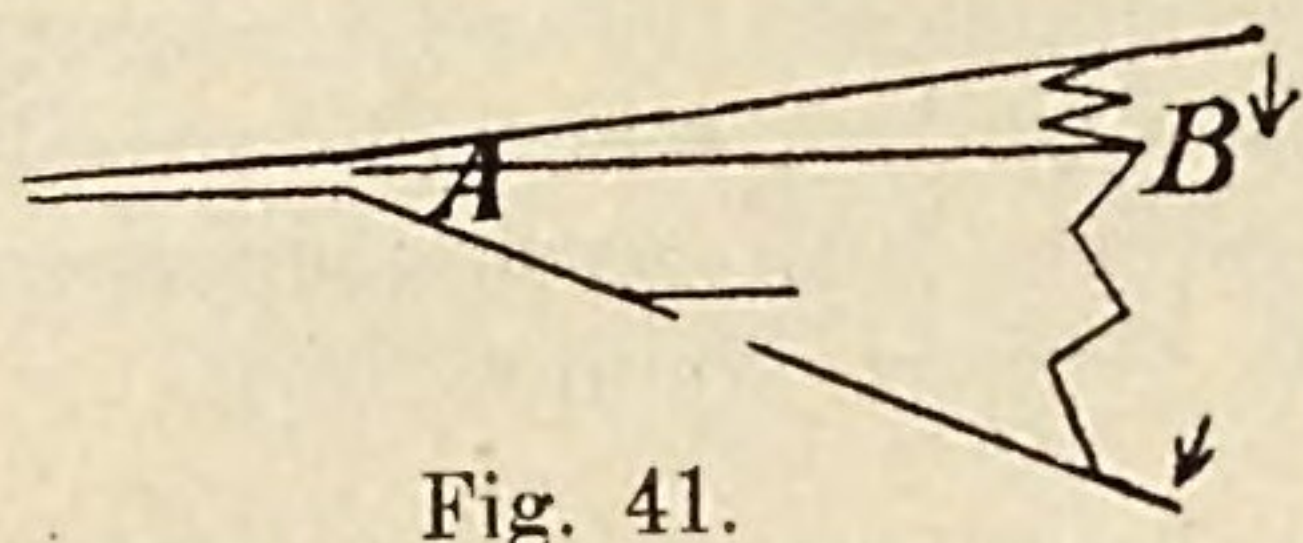


Fig. 41.

8. Der Zerstäuber. Zwei Röhrchen *A* und *B* (Fig. 42), von denen das eine in eine Flüssigkeit taucht, sind so unter einem rechten Winkel aneinander befestigt, dass die Mündung des einen dicht vor der des anderen steht; bläst man durch *B* einen Luftstrom, so werden die Luftteilchen in *A* mit fortgerissen, es entsteht also in *A* Luftverdünnung; die Flüssigkeit wird daher in *A* durch den Druck, welchen die äussere Luft auf die Flüssigkeit ausübt, gehoben und nach ihrem Austritte an der Mündung durch den Luftstrom zerstäubt.

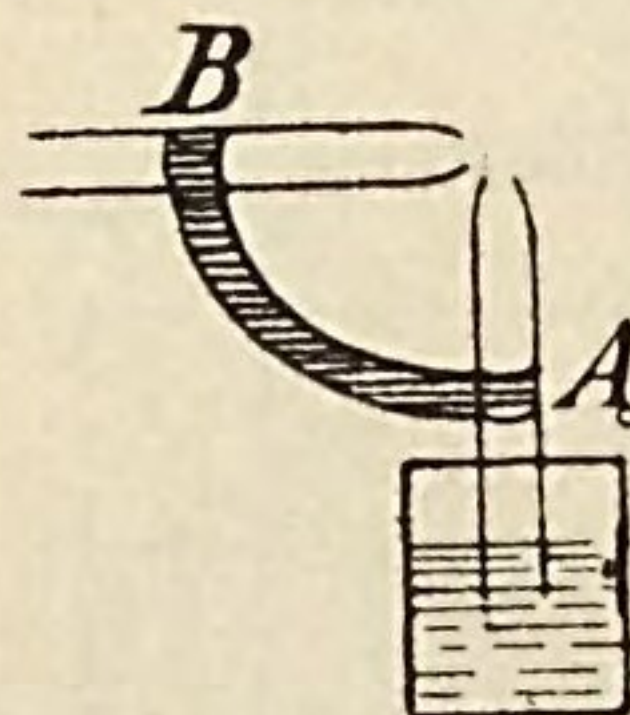


Fig. 42.

9. Die Windmühle ist ein Rad mit schief gestellten Flügeln, welches durch den Druck, den bewegte Luft auf diese Flügel ausübt, in eine drehende Bewegung versetzt wird.

46. Die Luftpumpe. Die Kompressionspumpe.

Die Luftpumpe, erfunden von dem Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke (1602—1686) dient dazu, die in

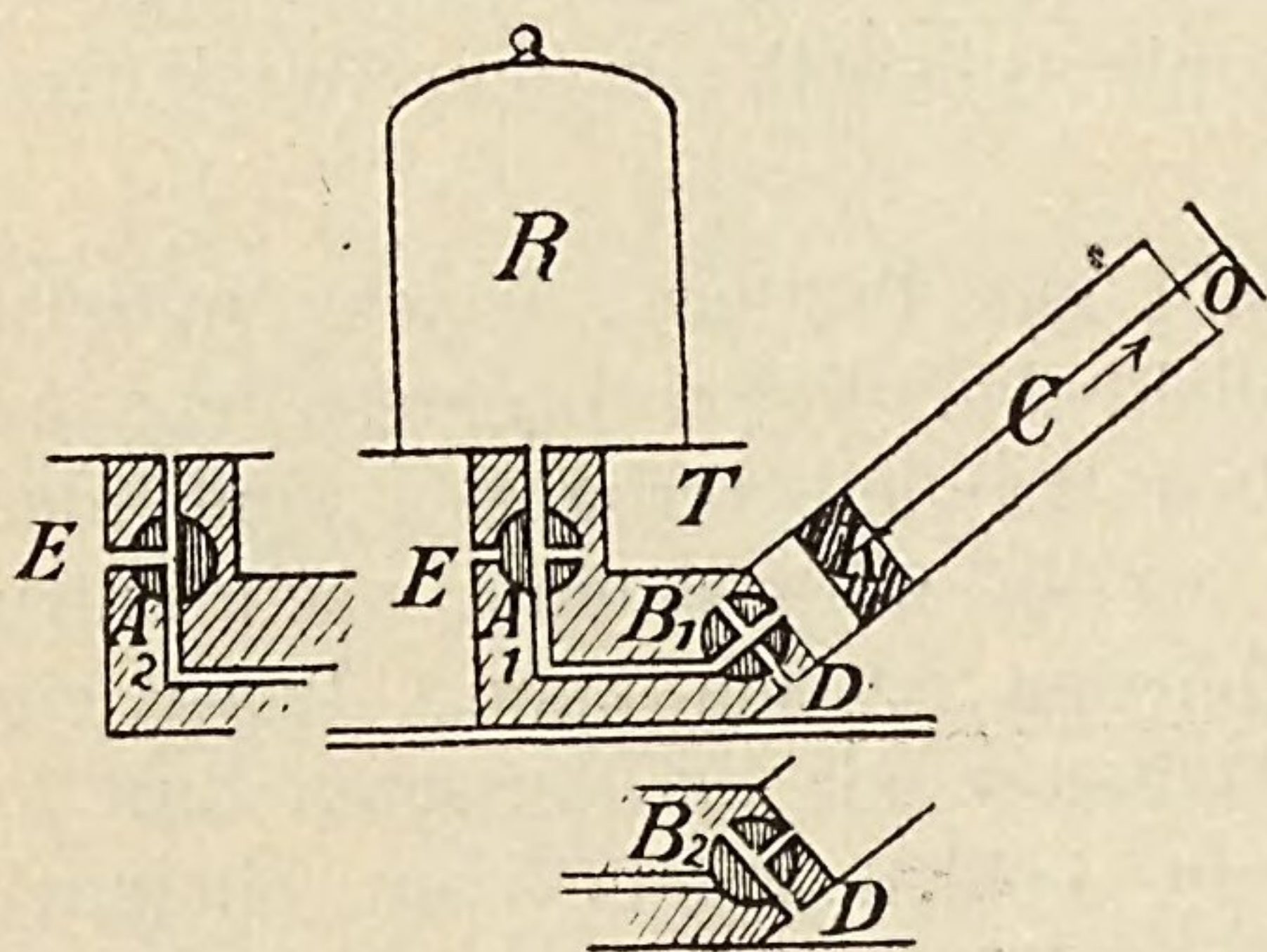


Fig. 43.

einem Gefässe eingeschlossene Luft möglichst zu verdünnen; sie besteht in ihrer einfachsten Form (Fig. 43) aus einem hohlen Cylinder *C*, dem sogenannten Stiefel, innerhalb dessen sich ein Kolben *K* möglichst luftdicht auf und ab bewegen lässt, vom Stiefel führt ein Gang zum Teller *T*, auf welchen das Gefäss, aus

dem die Luft entfernt werden soll, der Rezipient *R*, gleichfalls luftdicht aufgesetzt wird; am unteren Ende des Cylinders

und unterhalb des Rezipienten befinden sich verstellbare, zweifach durchbohrte Hähne, A_1 , B_1 , mittelst deren Cylinder und Rezipient sowohl unter sich als auch mit der äusseren Luft in Verbindung gebracht oder abgesperrt werden können; am oberen Ende hat der Cylinder eine kleine Öffnung O ; solche sind auch bei D und E . Wird nun der Kolben, der ursprünglich ganz unten im Cylinder stand, in die Höhe gezogen, während die Hähne so stehen, dass Cylinder und Rezipient in Verbindung stehen, aber von der äusseren Luft abgeschlossen sind (Hahnstellung A_1 , B_1), so wird die Luft aus dem Cylinder bei der Öffnung O hinausgetrieben, die Luft, welche im Rezipienten war, kann sich also auch in den Cylinder verbreiten und wird daher im Verhältnisse $v:(v+v')$ verdünnt, wenn v den Rauminhalt des Rezipienten, v' den des Cylinders bezeichnet. Dreht man hierauf den Hahn B so, dass der Cylinder mit der äusseren Luft in Verbindung kommt, der Rezipient aber sowohl vom Cylinder, als auch von der äusseren Luft abgesperrt wird (Hahnstellung A_1 , B_2) und drückt den Kolben hinab, so wird die Luft aus dem Cylinder hinausgetrieben, die im Rezipienten bleibt aber verdünnt. So oft man nun den Kolben in die Höhe zieht und wieder herabschiebt und dabei die Hähne jedesmal in die oben angegebene Stellung bringt, wird die Luft im Rezipienten neuerdings im nämlichen Verhältnisse verdünnt; war also ihre ursprüngliche Dichte d , so beträgt sie nach n maligem Hin- und Hergange des Kolbens $d' = d[v:(v+v')]^n$.

Um die Luft in den Rezipienten bei E wieder eindringen zu lassen, gibt man dem Hahne A die Stellung A_2 .

Die Verdünnung der Luft lässt sich aber auf diese Weise nur bis zu einer bestimmten Grenze bringen, weil man die zwischen Kolben und Rezipient befindliche Luft, den sogenannten schädlichen Raum, der immer unter dem Atmosphärendruck steht, nicht entfernen kann. Kleiner wird derselbe bei der zweistiefligen Pumpe, welche so eingerichtet ist, dass der Rezipient mit zwei Cylindern in Verbindung steht, in deren einem ein Kolben abwärts geht, während der Kolben des anderen gehoben wird; die Luft in dem schädlichen Raume des einen Cylinders kann sich dann auf den ganzen Raum des anderen verbreiten und wird dadurch verdünnt.

Bemerkung. Statt der oben erwähnten Hähne befinden sich an manchen Luftpumpen Ventile, eines am unteren Ende des Cylinders, das andere im durchbohrten Kolben; diese Ventile öffnen und schliessen sich infolge der wechselnden Spannkraft der Luft im Cylinder und im Rezipienten bezw. infolge ihrer Schwere selbstthätig.

Zusatz. Den höchsten Grad der Luftverdünnung erreicht man mit der Quecksilberluftpumpe, bei welcher das Quecksilber die Stelle des Kolbens vertritt. Unmittelbar unter dem Rezipienten befindet sich ein feststehendes Gefäss, welches durch einen Schlauch mit einem anderen Gefässe verbunden ist, das lotrecht gehoben und gesenkt werden kann. Die beiden Gefässe sowie der Schlauch sind teilweise mit Quecksilber gefüllt und stehen zunächst so, dass das Quecksilber das feststehende Gefäss bis oben füllt; senkt man das bewegliche Gefäss, so fällt das Quecksilber auch im anderen; die Luft im Rezipienten kann sich also auch auf dieses verbreiten und wird dementsprechend verdünnt. Wird nun das bewegliche Gefäss in die Höhe gehoben, das feststehende aber vom Rezipienten abgesperrt und mit der freien Luft in Verbindung gesetzt, so verdrängt das steigende Quecksilber die Luft aus letzterem. Der schädliche Raum ist bei dieser Luftpumpe wesentlich kleiner, weil das flüssige Quecksilber näher an die Öffnung des Rezipienten herandringen kann als der feste Kolben.

Der Grad der Luftverdünnung wird bei allen Luftpumpen an einem Quecksilbermanometer (abgekürzten Barometer) gemessen, welches mit dem Rezipienten in Verbindung steht.

Versuche mit der Luftpumpe.

1. Der Rezipient wird durch den Druck der äusseren Luft fest auf den Teller gepresst, wenn die Luft in demselben verdünnt ist.
2. Ein luftdicht verschlossener, nicht aufgeblasener Ballon oder ein eingeschrumpfter Apfel schwellen unter dem ausgepumpten Rezipienten an.
3. Aus einem oben offenen Gläschen, das etwa bis zu ein Drittel seiner Höhe mit Seifenschaum gefüllt ist, steigt dieser heraus.
4. Aus Wasser, das sich in einem Glase unter dem Rezipienten befindet, steigen bei zunehmender Luftverdünnung Luftblasen auf.
5. Aus einem unter dem Rezipienten befindlichen Heronsball springt das Wasser heraus, weil der Luftdruck innerhalb desselben grösser ist als im Rezipienten.
6. Ist der Rezipient ein etwas engerer Cylinder, der oben offen aber mit Pergamentpapier luftdicht zugebunden ist, so wird dieses durch den Druck der äusseren Luft gesprengt.
7. Quecksilber, das sich in einer auf dem eben genannten Cylinder aufgesetzten hölzernen Schale befindet, wird durch den Boden derselben hindurch gedrückt und fällt in feinen Tröpfchen im Cylinder herab.
8. Zwei hohle, luftdicht aneinander passende Halbkugeln haften, wenn die Luft in dem Hohlraume verdünnt ist, infolge des äusseren Luftdruckes fest aneinander.
9. In einer luftleeren Röhre fallen spezifisch leichte Körper

ebenso rasch wie schwerere, weil sie den Widerstand der Luft nicht zu überwinden haben.

Die Kompressionspumpe, welche dazu dient, die in einem Gefässe befindliche Luft oder ein Gas zu verdichten, hat dieselbe Einrichtung wie die (Verdünnungs-) Luftpumpe; nur müssen die Hähne bei jedem Kolbenzuge die verkehrte Stellung erhalten wie bei dieser, Ventile sich im entgegengesetzten Sinne öffnen und schliessen.

47. Gewichtsverlust der Körper in der Luft. Luftballon.

Weil Körper, die sich in einem Gase befinden, ebenso wie in einer Flüssigkeit einem Auftriebe unterworfen sind (41), so gilt auch hier das Archimedische Prinzip:

Jeder innerhalb eines Gases befindliche Körper verliert so viel von seinem Gewichte, als die von ihm verdrängte Gasmenge wiegt.

Bestätigender Versuch. Zwei Körper von ungleichem Rauminhalte seien an einer kleinen Wage so angebracht, dass sie sich in der Luft Gleichgewicht halten; bringt man diesen Apparat, Baroskop genannt, unter den Rezipienten einer Luftpumpe, so sinkt der grössere Körper um so tiefer herab, je mehr die Luft im Rezipienten verdünnt wird; derjenige von den beiden Körpern, welcher mehr Luft verdrängt, erleidet also in der Luft den grösseren Gewichtsverlust.

Bemerkung. Bei sehr genauen Wägungen muss daher sowohl der Gewichtsverlust, welchen der zu wiegende Körper, als auch der, den die Gewichtsstücke in der Luft erfahren, in Rechnung gezogen werden; im allgemeinen kann dieser Gewichtsverlust aber wegen des geringen spezifischen Gewichtes der Luft ausser Betracht bleiben.

Infolge des Auftriebes muss auch ein Körper in einem Gase schweben, zu Boden sinken oder entgegengesetzt der Richtung der Schwere aufsteigen, je nachdem sein spezifisches Gewicht ebenso gross, grösser oder kleiner ist wie das des Gases. Ein Luftballon wird daher bis zu der Höhe aufsteigen, in welcher das Gewicht der von ihm verdrängten Luftmenge seinem Gewichte (einschliesslich seiner Belastung) gleich ist.

Dritter Abschnitt.

Vom Schalle. (Akustik.)

A. Vom Schalle im allgemeinen.

48. Entstehung des Schalles. Arten desselben. Wellenbewegung.

Versuch. Wird eine gespannte Saite aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht und dann frei gelassen, so schwingt sie in die Gleichgewichtslage zurück, über diese hinaus, dann wieder zurück u. s. f.; während dieser Schwingungen hört man einen Ton (Schall). Hemmt man die Schwingungen einer Saite, so hört sie auch zu tönen auf. Reibt man einen Metallstab seiner Länge nach mit einem beharzten Wollappen, so wird ein an einem Faden aufgehängtes Kügelchen, welches das eine Stabende berührt, abgestossen, fällt zurück, wird wieder abgestossen u. s. f.; der Stab gerät also ebenfalls in Schwingungen; man hört wieder einen Ton (Schall), so lange diese Schwingungen dauern.

Der Schall entsteht daher durch schwingende Bewegung eines Körpers.

Gerät ein Körper plötzlich in heftige Schwingungen, so nennt man den dadurch entstehenden Schall einen Knall; wiederholen sich Schwingungen in unregelmässiger Folge, so verursachen sie ein Geräusch; gehen aber die Schwingungen regelmässig und gleichartig vor sich, so heisst der entstehende Schall ein Ton.

Die Schwingungen eines tönenden Körpers sind so klein und gehen so rasch vor sich, dass man sie mit dem Auge nicht wahrnehmen kann. Um nun ein Bild von dem Zustande eines schwingenden Körpers zu erhalten, befestige man 1. einen längeren Gummischlauch an seinen beiden Enden und versetze

ihm an irgend einer Stelle einen seitlichen Stoss; dadurch wird das unmittelbar getroffene Teilchen des Schlauches aus seiner Gleichgewichtslage gebracht, kehrt aber, weil es infolge seiner Verbindung mit den benachbarten Teilchen durch diese einen Antrieb in der dem Stosse entgegengesetzten Richtung erfährt, nicht nur in seine Gleichgewichtslage zurück, sondern schwingt nun über dieselbe nach der anderen Seite hinaus, wird hier wieder zurückgezogen u. s. f. Durch seine Bewegung sind nun aber auch die ihm nächst liegenden Teilchen, wenn auch etwas später, zu einer gleichen Hin- und Herbewegung veranlasst worden, von diesen die folgenden u. s. w. Auf diese Weise vollziehen nach einander alle Teilchen des Schlauches schwingende Bewegungen. In dem Augenblicke, in welchem das gestossene Teilchen einen vollen Hin- und Hergang gemacht hat, liegen alle Teilchen, auf die sich die Bewegung bis dahin erstreckte, zu beiden Seiten des ersteren je

auf einer krummen Linie *ABCDE* (Fig. 44); diese nennt man eine Welle, die Strecke *AE*, auf der sich ihre Teilchen in der Ruhelage befinden, die Wellenlänge; die

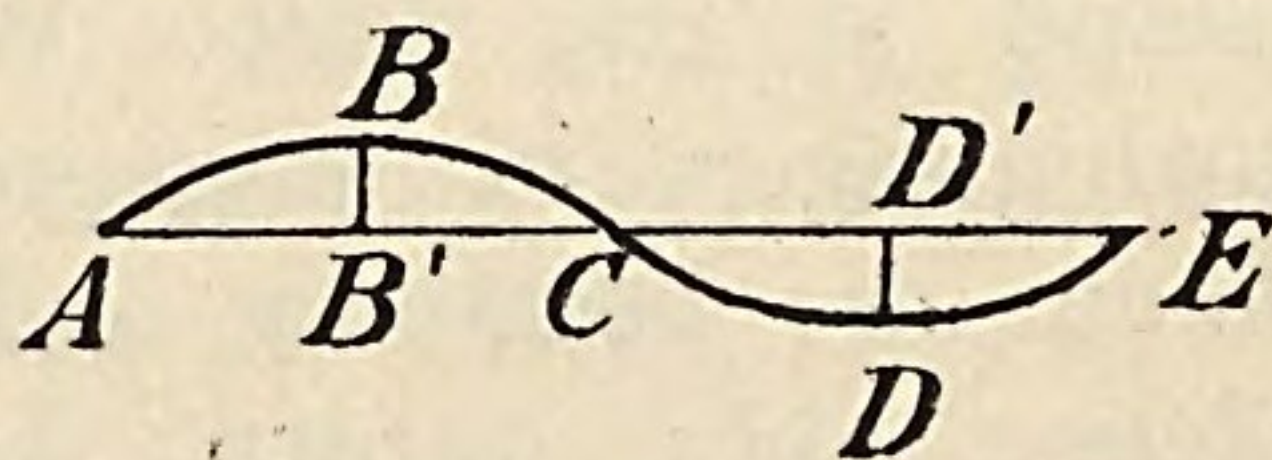


Fig. 44.

beiden Teile der Welle *ABC* und *CDE* diesseits und jenseits der Gleichgewichtslage heissen Wellenberg und Wellenthal, die grösste Entfernung eines Teilchens von seiner Gleichgewichtslage z. B. *BB'* oder *DD'* Schwingungsweite. Die Bewegung wird Wellenbewegung genannt; sie ist transversal und fortschreitend.

2. Befestigt man ferner eine geradlinige Drahtspirale (Sprungfeder) an beiden Enden, verschiebt einen Ring derselben in der Richtung ihrer Achse und lässt ihn dann los, so macht dieser und nach ihm alle Ringe hin- und herschwingende Bewegung, aber nicht zu beiden Seiten der Achse (wie oben beim Schlauche), sondern in der durch dieselbe bestimmten Richtung. Man nennt auch diese Bewegung eine fortschreitende Wellenbewegung, aber eine longitudinale; sie äussert sich in fortschreitenden Verdichtungen und Verdünnungen des schwingenden Körpers. Eine Welle umfasst auch hier alle Teilchen auf je einer Seite des zuerst in seinem Gleichgewichte gestörten Teilchens, die sich in dem Augenblicke in Schwingung befinden, in welchem dieses einen vollen Hin- und Hergang gemacht hat. Wellenlänge,

Wellenberg, Wellenthal und Schwingungsweite haben die entsprechende Bedeutung wie oben.

3. Die Zeit t , innerhalb deren ein Teilchen bei einer Wellenbewegung eine Schwingung, d. h. einen Hin- und Hergang macht, nennt man seine Schwingungszeit; die Zahl n von Schwingungen, die es in einer Sekunde vollzieht, seine Schwingungszahl; es ist also $t = 1:n$ oder $n \cdot t = 1$.

In derselben Zeit t schreitet aber die Welle um ihre Länge l fort (siehe 48. 1 u. 2), folglich in einer Sekunde um die Strecke $v = n \cdot l$ oder $v = l:t$; diese Strecke v heisst die Geschwindigkeit der Wellenbewegung.

4. Werden an zwei Punkten des oben genannten Schlauches oder der Drahtspirale fortdauernd Wellen von gleicher Länge und gleicher Schwingungsweite, aber entgegengesetzter Fortpflanzungsrichtung erregt, so werden einzelne Teilchen, deren Abstand je eine halbe Wellenlänge beträgt, fortwährend zu Schwingungen in entgegengesetztem Sinne veranlasst; diese bleiben also beständig in Ruhe; die zwischen diesen liegenden Teilchen aber werden durch die beiden Wellenbewegungen einmal zu Schwingungen in gleichem, dann wieder im entgegengesetzten Sinne angeregt; es entstehen also Wellen mit unbeweglichen End- und Mittelpunkten; man nennt sie deshalb stehende Wellen; die unbeweglichen Punkte heissen Schwingungsknoten, die halben Wellen Schwingungsbäuche.

Fig. 45 zeigt das Bild einer stehenden transversalen Welle in vier Momenten, in welchen sich zwei gleiche, fortlaufende Wellen um je $\frac{1}{4}$ ihrer Länge im entgegengesetzten Sinne verschoben haben; A und B sind die Knoten.

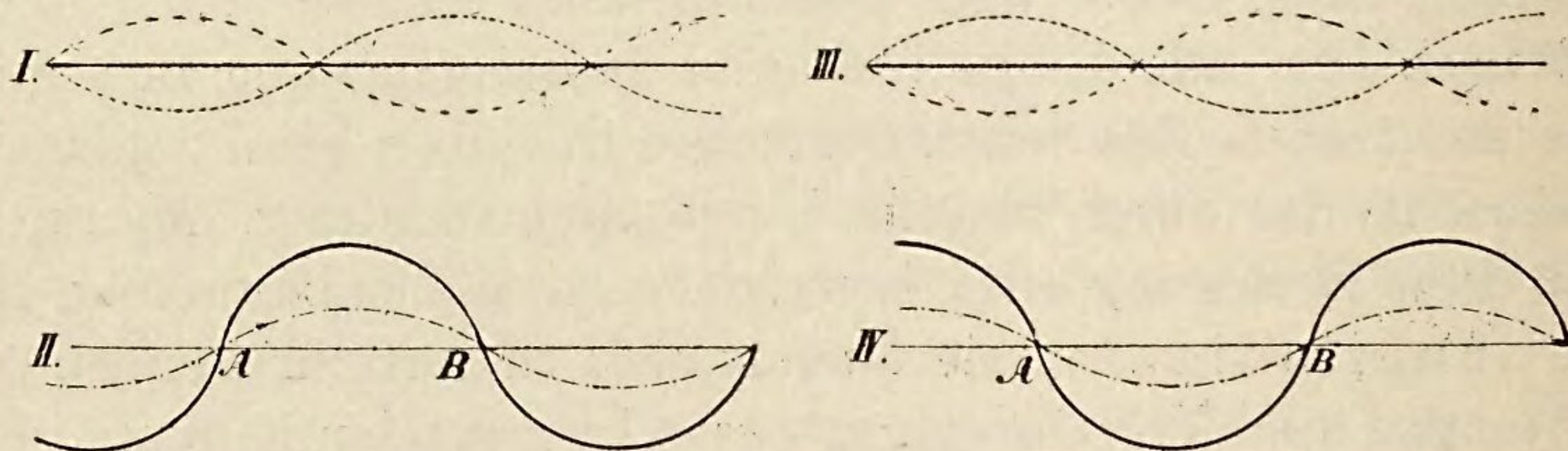


Fig. 45.

5. Die schwingenden Bewegungen, welche ein Körper macht, wenn er einen Schall erzeugt, sind stehende Wellenbewegungen.

49. Fortpflanzung des Schalles. Geschwindigkeit desselben.

Versuch. Bringt man eine Glocke, welche ein Hammer durch eine mechanische Vorrichtung zum Tönen veranlasst, unter den Rezipienten einer Luftpumpe, so wird der Ton um so schwächer, je mehr die Luft im Rezipienten verdünnt wird.

Hängt man ein eisernes Stäbchen an einem Faden auf, wickelt diesen um je einen Finger der beiden Hände und bringt diese Finger an den Gehörgang der Ohren, während man das Eisenstäbchen wiederholt an einen festen Gegenstand stossen lässt, so hört man einen viel tieferen, volleren Ton, als wenn man denselben Versuch macht, aber ohne die Finger an die Ohren zu legen.

Der Ton einer Glocke wird auch dann gehört, wenn diese unter Wasser angeschlagen wird.

Einen Schall nehmen wir nur dann wahr, wenn sich zwischen dem Schallerreger und unserem Ohre ein Stoff befindet, der den Schall auf dieses überträgt; gewöhnlich ist Luft der Schallleiter; aber auch feste und flüssige Körper leiten den Schall.

Erklärungen. Durch die schwingenden Bewegungen des Schallerregers werden in der ihn umgebenden Luft fortschreitende longitudinale Wellen erzeugt; diese pflanzen sich als aufeinanderfolgende Luftverdichtungen und Luftverdünnungen auf allen von der Schallquelle ausgehenden Geraden fort, welche letztere deshalb Schallstrahlen genannt werden. Treffen Schallstrahlen auf unser Ohr, so setzen sie das Trommelfell desselben in Schwingungen und vermitteln uns so den Schall.

In ruhiger Luft von gleicher Dichte werden nun alle Luftteilchen auf je einer Kugelfläche, deren Mittelpunkt der Ort des Schallerregers ist, gleichzeitig in Schwingungen versetzt; also muss man an allen Punkten, welche von der Schallquelle gleichweit entfernt sind, den Schall gleichzeitig hören.

Beobachtungen. Schlägt jemand mit einem Hammer auf einen festen Gegenstand, so hört ein davon entfernt stehender Beobachter den beim Aufschlage entstehenden Schall später, als er den Hammer auffallen sieht; wird an einem Orte *A* eine Kanone abgeschossen, so hört man an einem anderen Orte *B* den Knall des Schusses später als man das Aufleuchten des Pulvers sieht; da nun letzteres in *B* unmessbar kurze Zeit nach seinem Entstehen in *A* wahrgenommen wird, so ist die Zeit, welche in *B* zwischen der Beobachtung der Lichterscheinung und der des Knalles verfließt, ebenso gross, wie die, welche der Schall

braucht, um von *A* nach *B* zu gelangen. Wiederholte Messungen dieser Zeit sowie der Entfernung der Schallquelle *A* vom Beobachtungsorte *B* ergaben nun das Gesetz:

Der Schall durchläuft die gleiche Strecke stets in der gleichen Zeit; die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft, das heisst der Weg, welchen er in der Zeitsekunde zurücklegt, beträgt bei 0° Wärme 333 m; seine Geschwindigkeit nimmt bei höherer Temperatur etwas zu, ist aber vom Luftdrucke unabhängig; in der Richtung eines Windes bewegt er sich schneller als gegen denselben.

In ähnlicher Weise wie in der Luft lässt sich auch die Geschwindigkeit des Schalles im Wasser messen; sie beträgt 1435 m; auf einem anderen Wege (siehe 54) kann die Schallgeschwindigkeit in festen Körpern bestimmt werden; sie beträgt beispielsweise in Stahl 5030 m, in Glas 5438 m.

Die Geschwindigkeit des Schalles ist also in festen und flüssigen Körpern grösser als in der Luft.

50. Schallstärke. Zurückwerfung des Schalles.

Versuch. Eine gespannte Saite gibt einen um so kräftigeren Schall, zu je grösseren Schwingungen ihre Teilchen durch Streichen mittelst eines Bogens veranlasst werden. Der Schall nimmt ab, wenn die Schwingungen der Saite kleiner werden. Je dicker eine Saite ist, desto stärker ist der von ihr erzeugte Schall.

Die Stärke eines Schalles ist bei gleicher Entfernung von der Schallquelle um so grösser, je mehr Masse der den Schall erzeugende Körper hat und je grösser die Schwingungsweite seiner Teilchen ist.

Die Schallstärke nimmt aber, wie die Beobachtung zeigt, bei gleich bleibender Stärke der Schallquelle mit der Entfernung von dieser ab und zwar wird sie in dem Verhältnisse kleiner, in welchem das Quadrat der Entfernung von der Schallquelle grösser wird.

Erklärung. Die Stärke eines Schalles nimmt um so mehr ab, je mehr Luftteilchen der vom Schallerreger ausgehende Schall in Schwingungen versetzt; die Zahl dieser Luftteilchen wächst aber, weil die Wellenbewegung nach 49. sich kugelförmig um den Schallerreger ausbreitet, mit dem Quadrate der Entfernung von demselben; die Schallstärke muss also in eben diesem Verhältnisse kleiner werden.

Zusatz. An der Mündung eines mit Luft gefüllten Rohres hört man den Schall stärker als in freier Luft, weil dieses eine allseitige Ausbreitung der Schallwellen hindert.

Beobachtung. Trifft der Schall auf eine Wand, so wird er zurückgeworfen und man hört ihn zum zweiten Male.

Erklärung, Die Luftteilchen, welche sich unmittelbar vor der Wand befinden, werden infolge der schwingenden Bewegung, in die sie durch den Schall geraten, wechselweise stärker, dann wieder schwächer gegen die Wand geschleudert, prallen aber in gleicher Weise von dieser wieder zurück und verursachen so in der Luft eine rückläufige Wellenbewegung, welche an unser Ohr gelangend uns den, von der nämlichen Schallquelle ausgehenden Schall ein zweites Mal vernehmen lässt. Diesen zweiten Schall nennt man Nachhall, wenn er unser Ohr erreicht, noch während es den direkten Schall vernimmt, dagegen Echo, wenn das Ohr den zurückgeworfenen Schall vom direkten deutlich unterscheiden kann. Erfahrungsgemäss entsteht ein deutliches Echo eines einsilbigen Wortes, wenn sich der Sprechende wenigstens 17 bis 18 m vor einer Wand befindet; ein zwei- oder mehrsilbiges Echo ergibt sich, wenn die Wand so viel mal 17 bis 18 m von dem Sprechenden entfernt ist, als das gesprochene Wort Silben hat. Ein mehrfaches Echo erfordert mehrere Wände, welche den Schall zurückwerfen.

Von krummen Flächen können Schallwellen nach einem Punkte hin oder in parallelen Richtungen zurückgeworfen werden; letzteres ist der Fall beim Sprach- sowie beim Hörrohre.

B. Von den Tönen.

51. Tonhöhe. Tonintervalle. Tonleiter. Klänge.

Töne unterscheiden sich ausser durch ihre Stärke (siehe 50) namentlich durch ihre Höhe. Die Gesetze der Tonhöhe ergeben sich aus folgendem Versuche:

Eine kreisförmige Scheibe (Fig. 46) ist an mehreren Punkten, die sich auf konzentrischen Kreisen in gleicher Entfernung von einander befinden, durchbohrt. Wird nun die Scheibe etwas rasch, aber gleichmässig gedreht und gleichzeitig mittelst eines Röhrchens gegen einen solchen Kreis ein Luftstrom geblasen, so entsteht ein Ton; denn da dieser Luftstrom wechselweise durch eine Durchbohrung dringen kann, dann wieder auf die Scheibe stösst, muss die dieselbe umgebende Luft in Schwingungen geraten.

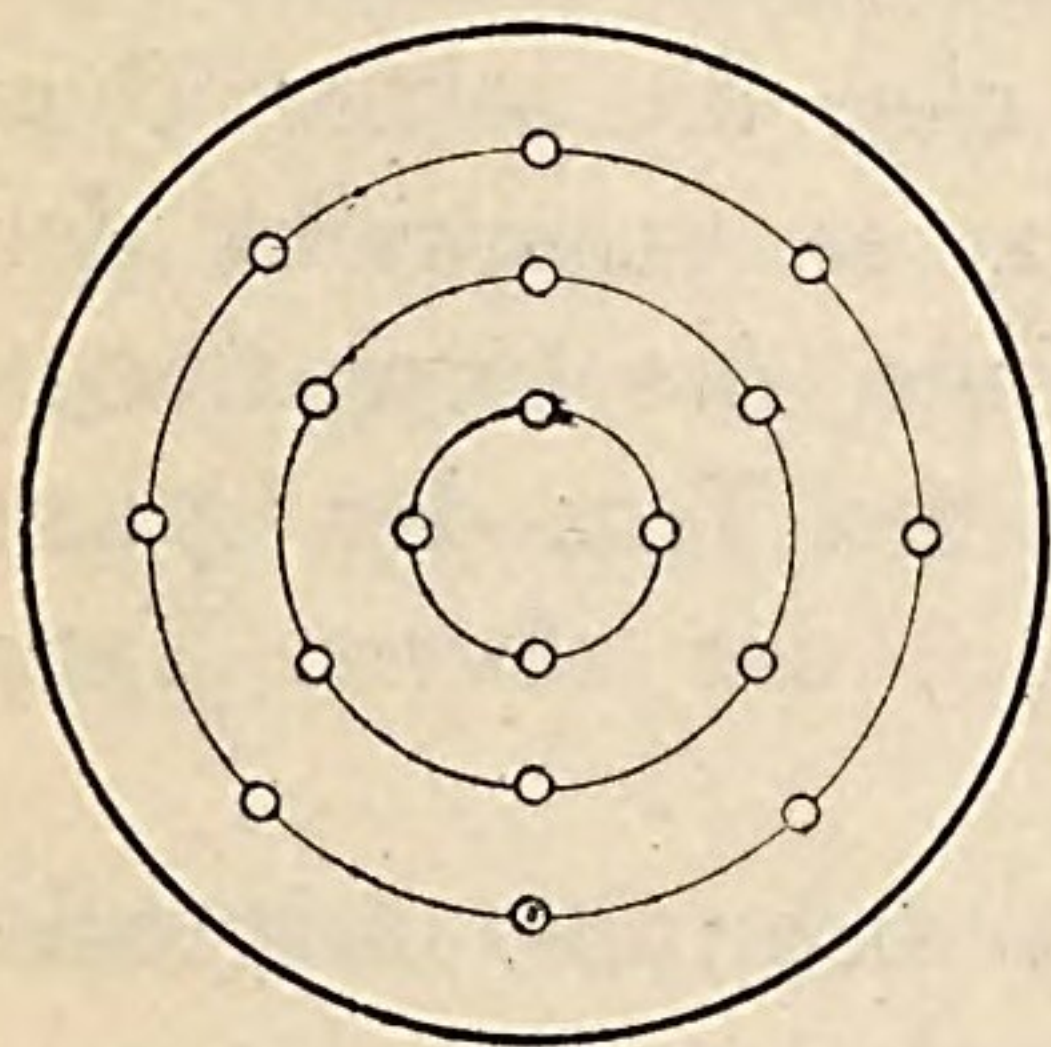


Fig. 46.

Der Ton bleibt derselbe, so lange sich die Scheibe mit gleicher Geschwindigkeit dreht und der Luftstrom gegen denselben Kreis geleitet wird; dreht man aber die Scheibe schneller oder bläst man bei gleicher Drehungsgeschwindigkeit gegen einen mit einer

grösseren Zahl von Durchbohrungen versehenen Kreis, so wird der Ton höher.

Die Höhe eines Tones hängt also von der Zahl der Schwingungen des den Ton erzeugenden Körpers ab; die Schwingungszahl eines tönenden Körpers ist daher ein Mass für die Tonhöhe.

Zusatz. Dreht sich die Scheibe, Sirene genannt, in einer Sekunde bei Erzeugung eines bestimmten Tones n mal und hat der angeblasene Kreis m Durchbohrungen, so ist $n \cdot m$ die Schwingungszahl dieses Tones. Das sogenannte Normal- a der Pariser Stimmung hat die Schwingungszahl 435.

Erklärung. In der Musik versteht man unter einer diatonischen Durtonleiter eine Aufeinanderfolge von acht Tönen in ganz bestimmten Zwischenräumen, die man Intervalle nennt; der Grundton wird Prim genannt, der zweite Ton Sekund, die folgenden Terz, Quart, Quint, Sext, Septim und Oktave.

Versuch. Hat ein Kreis einer Sirene n Durchbohrungen, ein anderer $2n$, so gibt letzterer bei gleicher Drehungsgeschwindigkeit der Scheibe die Oktave des Tones des ersteren Kreises an; verhalten sich die Zahlen der Durchbohrungen zweier Kreise wie 2:3, so ergibt sich ein Ton und seine Quint; bei dem Verhältnisse 3:4 ist der höhere Ton die Quart und bei dem Verhältnisse 4:5 die Terz des tieferen Tones.

Die (musikalischen) Intervalle der Töne sind also durch das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen bestimmt.

Die Verhältniszahlen der übrigen Intervalle der Durtonleiter können ebenfalls durch Versuche festgestellt werden, lassen sich aber auch aus den obigen berechnen; setzt man nämlich die Schwingungszahl des Grundtones gleich 1, also die seiner Terz gleich $\frac{5}{4}$, der Quart $\frac{4}{3}$ und der Quint $\frac{3}{2}$, so entspricht der Sekund als der tieferen Quart von der Quinte des Grundtones die Zahl $\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$, der Sext als der höheren Terz der Quart des Grundtones $\frac{4}{3} \cdot \frac{5}{4} = \frac{5}{3}$ und der Septim, der oberen Terz der Quint, $\frac{3}{2} \cdot \frac{5}{4} = \frac{15}{8}$.

Für die Töne der Durtonleiter ergeben sich also folgende Verhältnisse der Schwingungszahlen:

Prim	Sekund	Terz	Quart	Quint	Sext	Septim	Oktave
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2;

demnach sind für die unmittelbar aufeinander folgenden Töne die Quotienten der Schwingungszahlen

$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$
---------------	----------------	-----------------	---------------	----------------	---------------	-----------------

Das Intervall, dessen Schwingungszahlen den Quotienten $\frac{9}{8}$ haben, heisst grosser ganzer Ton, dem Quotienten $\frac{10}{9}$ entspricht der kleine ganze Ton, $\frac{16}{15}$ der halbe Ton.

Bemerkung. Setzt man die Schwingungszahl eines bestimmten Tones, etwa c, gleich 1, so geben die obigen Zahlen unmittelbar die Schwingungszahlen der Töne derjenigen Durtonleiter an, für welche dieser Ton Grundton ist; um dieselben für eine andere Tonleiter zu finden, muss man die Schwingungszahl ihres Grundtones mit eben diesen Zahlen multiplizieren, weil ja die Intervalle für alle Durtonleitern dieselben sind; so sind beispielsweise die Schwingungszahlen für die d-dur-Skala $\frac{9}{8}$; $\frac{9}{8} \cdot \frac{9}{8} = \frac{81}{64}$; $\frac{9}{8} \cdot \frac{5}{4} = \frac{45}{32}$; $\frac{9}{8} \cdot \frac{4}{3} = \frac{3}{2}$ u. s. w. Zwischen der Sekund der d-dur-Skala und der Terz von c besteht also ein kleiner Unterschied, den man aber vernachlässigt; dagegen ist die Terz der d-dur-Skala um einen halben Ton höher als die Quart von c; es muss also zwischen die Töne f und g ein Ton eingeschaltet werden, welchen man mit fis bezeichnet. Derartige Tonerhöhungen müssen bei bestimmten Tönen aller übrigen Tonleitern vorgenommen werden; Tonerniedrigungen erfordern die Molltonleitern, welche sich von den Durtonleitern dadurch unterscheiden, dass bei ihnen an Stelle der grossen Terz, einer Aufeinanderfolge eines grossen und eines kleinen ganzen Tones, die kleine Terz tritt, bei welcher auf einen grossen ganzen, ein halber Ton folgt.

Um alle Dur- und Molltonleitern angeben zu können, müsste man also zwischen den acht Haupttönen Zwischentöne einschalten, deren Intervalle aber nicht ganz gleich sind; da dies in der praktischen Musik nicht möglich ist, benützt diese eine allerdings etwas anders als die natürliche klingende Tonleiter, welche aus dreizehn aufeinanderfolgenden halben Tönen von gleichem Intervalle besteht. (Gleichschwebende Temperatur.)

Zwei oder mehrere, gleichzeitig entstehende Töne erzeugen einen Klang (Zweiklang, Dreiklang, Akkord); macht derselbe auf das Ohr einen angenehmen Eindruck, so nennt man die Töne, welche ihn erzeugen, konsonierend, ausserdem dissonierend. Zu den Konsonanzen rechnet man den Grundton und je seine Oktave, seine Quint, Quart und Terz, also diejenigen Tonpaare, deren Schwingungszahlen sich wie die kleinsten ganzen Zahlen verhalten.

52. Entstehung von Tönen durch transversale Schwingungen von Saiten oder Stäben. Die Stimmgabel.

Versuche. Die Gesetze der durch transversal schwingende Saiten entstehenden Töne werden am Monochorde untersucht. Dasselbe besteht aus einem hohlen, unten offenen, langen, aber schmalen Kasten von Holz (Fig. 47) an dessen (schmalen) Gegenkanten eine Saite oben so festgeklemmt wird, dass sie in ihrer

ganzen Länge frei schwingen kann; um Teile derselben in

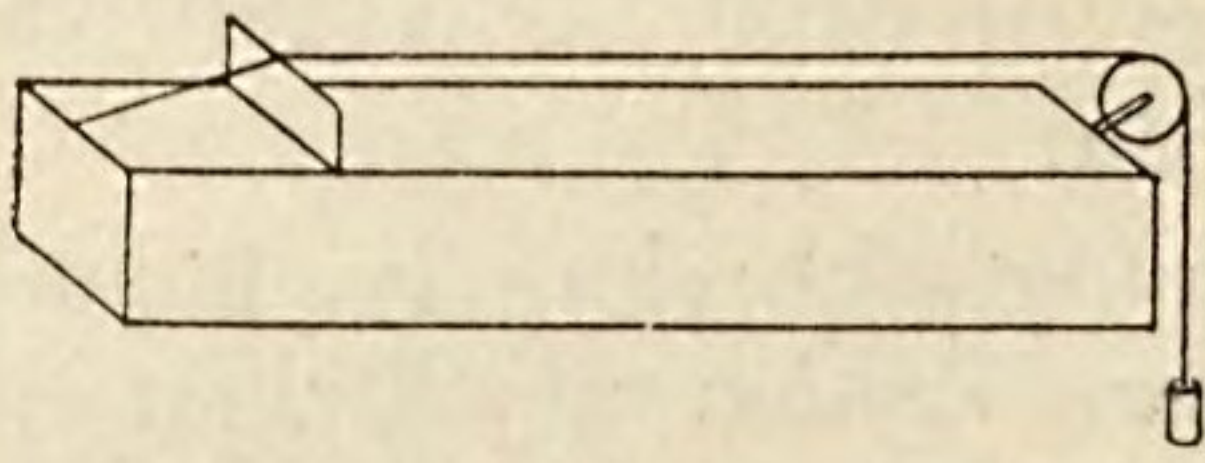


Fig. 47.

Schwingungen versetzen zu können, kann ein Steg an beliebiger Stelle zwischen Kasten und Saite eingeklemmt werden. Die Länge der Saite und ihrer Teile kann an einem Massstabe abgelesen werden.

a) Streicht man die Saite mittelst eines Violinbogens an, so erhält man, wenn sie in ihrer ganzen Länge schwingt, den Grundton derselben; bringt man den Steg an ihren Mittelpunkt, so dass beim Streichen nur ihre Hälfte in Schwingungen gerät, so ergibt sich die Oktave des Grundtones; wird der Steg so verschoben, dass nur das Viertel der Saite schwingen kann, so entsteht seine zweite Oktave u. s. w. Lässt man ferner nur $\frac{2}{3}$ der Saite schwingen, so ergibt sich die Quint, bei $\frac{3}{4}$ der Saitenlänge die Quart u. s. w.; die genannten Intervalle verhalten sich aber (nach 45) der Reihe nach wie $1:2:4:\frac{3}{2}:\frac{4}{3}$.

1. *Unter sonst gleichen Umständen verhalten sich also die Höhen (Schwingungszahlen) der von einer transversal schwingenden Saite erzeugten Töne umgekehrt wie die Saitenlängen.*

b) Befestigt man eine Saite wie oben an einer Kante, führt sie aber über die andere Kante lose hinweg und hängt an ihrem freien Ende ein Gewicht zur Spannung der Saite an, so geht der Ton in die Höhe; seine Schwingungszahl wächst, wenn das spannende Gewicht schwerer wird; vergleicht man die Schwingungszahlen der Töne, welche dieselbe Saite bei verschiedenen Spannungen ergibt, so findet man:

2. *Die Tonhöhen (Schwingungszahlen) transversal schwingender Saiten verhalten sich unter sonst gleichen Umständen direkt wie die Quadratwurzeln aus den spannenden Gewichten.*

c) Sind zwei gleich lange Saiten, welche verschiedenes Gewicht haben, durch ein gleich grosses Gewicht gespannt, so gibt die schwerere Saite den tieferen Ton; wägt man gleiche Längen der beiden Saiten ab, so ergibt sich:

3. *Die Tonhöhen transversal schwingender Saiten verhalten sich unter sonst gleichen Umständen umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus ihren Gewichten.*

Die Tonhöhe (Schwingungszahl) einer transversal schwingenden Saite ist also umgekehrt proportional ihrer Länge sowie der Quadrat-

wurzel ihres Gewichtes, aber direkt proportional der Quadratwurzel des spannenden Gewichtes.

d) Berührt man einen Punkt einer Saite, welcher ihre Länge im Verhältnisse $1:n$ teilt, leise mit dem Finger und streicht mit dem Bogen über den kürzeren Teil, so erhält man für jedes ganzzahlige n einen oberhalb des Grundtones liegenden Ton und zwar für $n=1$ seine Oktave, für $n=2$ die Quint der Oktave, für $n=3$ die Oktave der Oktave, für $n=4$ die Terz der letzteren u. s. w. Setzt man gleichzeitig auf die Saite Papierreiterchen auf, so werden diese an allen Stellen der Saite abgeworfen mit Ausnahme derjenigen Punkte, welche die Saite in $n+1$ gleiche Teile teilen. Es bilden sich also nicht nur an der berührten Stelle, sondern in allen Punkten, welche eine Saite in die entsprechende Zahl von gleichen Teilen teilen, Schwingungsknoten.

4. Die Töne einer Saite, welche dadurch entstehen, dass sich auf ihr während des Schwingens gleich weit von einander und den Endpunkten der Saite abstehende Knoten bilden, konsonieren mit ihrem Grundtone oder mit den höheren Oktaven desselben; man nennt sie deshalb die harmonischen Obertöne der Saite. (Flageoletttöne.)

Zusatz. Für den Grundton ist die Wellenlänge doppelt so gross wie die Saitenlänge.

Auch Stäbe können durch seitliche Stösse oder durch Streichen mittelst eines Bogens in transversale Schwingungen versetzt und infolgedessen zum Tönen gebracht werden wie z. B. die Stimmgabel, ein U-förmig gebogener, in der Mitte an einem Stiele befestigter Stab (Fig. 48). Beim Tönen bilden sich zu beiden Seiten ihrer Mitte nahe an dieser zwei Schwingungsknoten; die oberhalb derselben befindlichen Zinken schwingen frei und zwar gleichzeitig nach aussen oder innen, der Bogen zwischen den Knoten und mit ihm der Stiel auf- und abwärts.

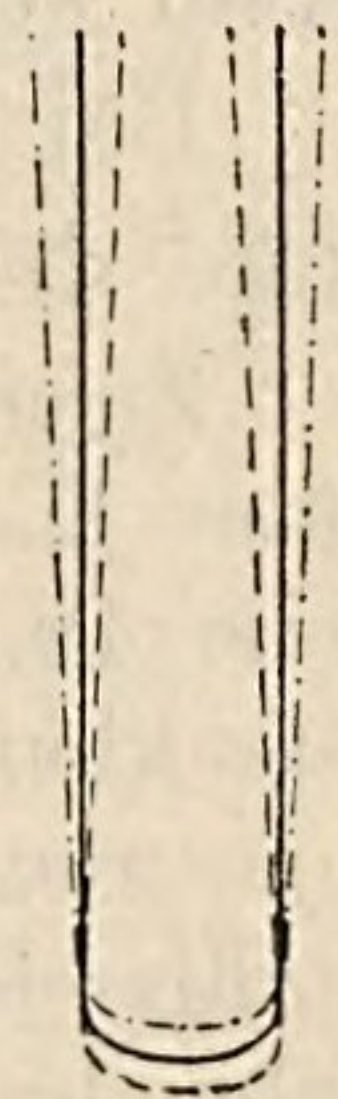


Fig. 48.

53. Töne transversal schwingender Platten.

Versuch. Befestigt man eine dünne Platte aus Glas oder Metall an einem Punkte und streicht an ihrem Rande mit einem Bogen hin, so entsteht ein Ton; ist die Platte mit einem feinen Pulver bestreut, so geraten die Teilchen desselben in heftige

Bewegungen und häufen sich dann in bestimmten Linien an; die Platte teilt sich also beim Tönen in transversal schwingende Abschnitte, welche durch nicht schwingende Linien von einander getrennt sind; letztere heissen Knotenlinien.

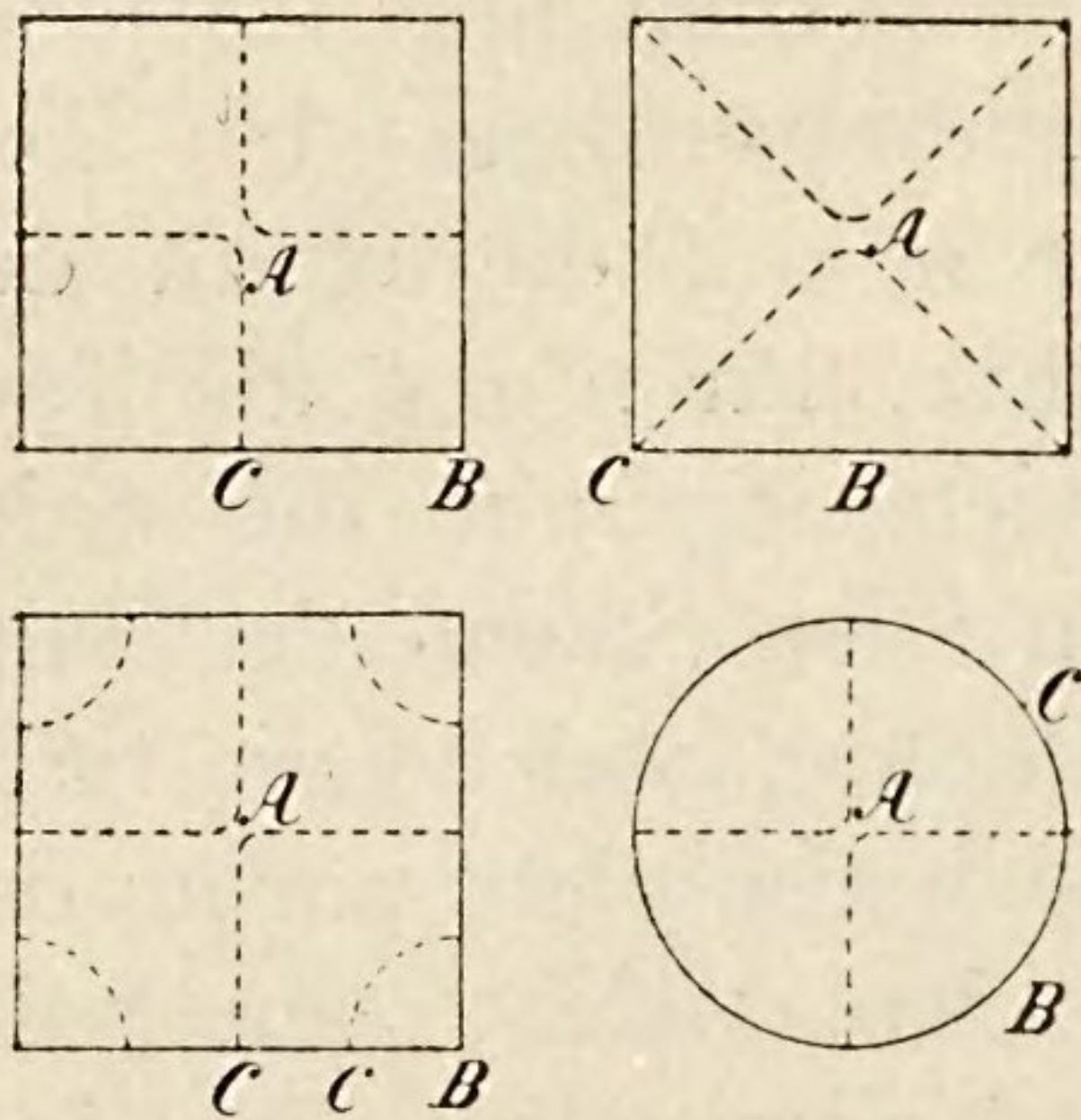


Fig. 49.

Die Gestalt der Knotenlinien hängt von der Gestalt der Platte und der Lage des Befestigungspunktes ab; berührt man die Platte während des Streichens an einer oder mehreren Stellen mit dem Finger, so geht der Ton in die Höhe und die Knotenlinien werden verzweigter. (Chladnis Klangfiguren.)

Bemerkung. In der Figur 49 bezeichnet A den Befestigungspunkt, B die Strichstelle, C die Berührungspunkte.

In ähnlicher Weise schwingen beim Tönen auch gespannte, elastische Häute (Trommel), sowie Glocken.

54. Töne longitudinal schwingender Stäbe.

Versuch. Ein seiner Länge nach geriebener Stab gerät in Schwingungen (siehe Versuch zu 48) und gibt einen Ton; *seine Höhe ist der Länge des Stabes verkehrt proportional, bei gleichem Materiale aber von der Dicke fast unabhängig.* Die Töne longitudinal schwingender Stäbe sind viel höher als die transversal schwingender Körper.

Bei einem in der Mitte festgeklemmten Stabe ist die Wellenlänge des Tones doppelt so gross wie die Stablänge.

Zusatz. Mit Hilfe der Wellenlänge von Tönen longitudinal geriebener Stäbe lässt sich die Schallgeschwindigkeit in festen Körpern messen (siehe 49.). Schiebt man nämlich die eine Hälfte eines in der Mitte festgeklemmten Stabes in eine Glasröhre, in welche etwas Korkmehl eingestreut ist und deren anderes Ende mittelst eines Korkpfropfens abgeschlossen wird, so erzeugen die Longitudinalschwingungen des freien Stabendes in der in der Röhre abgesperrten Luftsäule stehende Schwingungen, welche das Korkmehl wellenförmig anhäufen. In der Luftsäule entstehen ebensoviel Schwingungen wie im Stabe, die Schwingungszahl n des Tones ist daher in beiden die gleiche; bezeichnet man nun mit v die Schallgeschwindigkeit im Stabe, mit v' die in der Luft, mit l die Stablänge, mit l' die (messbare) Entfernung je zweier Knotenpunkte der Korkmehlhäufchen in der Röhre, so ist nach (48, 3) $v = n \cdot 2l$ und $v' = n \cdot 2l'$; folglich $v:v' = l:l'$; also $v = v' l:l'$ oder (nach 49) $v = 333 \cdot l:l'$ (m).

55. Töne schwingender Luftmassen.

Versuche. Wird eine mit Luft gefüllte Pfeife an dem einen Ende mittelst einer geeigneten Vorrichtung (siehe 56) angeblasen, so entsteht ein Ton; *seine Höhe ist unter sonst gleichen Umständen der Länge der Pfeife umgekehrt proportional*; verhalten sich also die Längen zweier Pfeifen beispielsweise wie 3 : 2, so gibt die kürzere die Quint des Tones der längeren.

Eine Pfeife kann an ihrem anderen Ende offen oder verschlossen (gedeckt) sein; *bei gleicher Länge gibt die offene Pfeife den um eine Oktav höheren Ton der gedeckten*; ist eine offene Pfeife doppelt so lang wie eine gedeckte, so geben die Pfeifen denselben Ton. Durch stärkeres Anblasen einer Pfeife entstehen Töne, welche höher sind als ihr Grundton und zwar bei einer offenen Pfeife seine Oktav, dann die Quint derselben, bei einer gedeckten die Quint der Oktave, dann die Terz der zweiten Oktave.

Erklärung. Diese Gesetze sind eine Folge der unter 48. dargelegten Gesetze über die Entstehung von Tönen; werden nämlich an dem einen Ende einer Pfeife abwechselnd Luftverdichtungen und Verdünnungen erzeugt, so pflanzen sich diese durch die in der Pfeife befindliche Luft bis zu dem anderen Ende derselben fort, werden dort zurückgeworfen und geben also nach 48. 4 Anlass zur Bildung stehender, einen Ton erzeugender Wellen.

An dem Ende, an welchem die Pfeife angeblasen wird, entsteht unter allen Umständen ein Wellenbauch, weil die Luftteilchen an dieser Stelle fortwährend aus ihrer Gleichgewichtslage getrieben werden. Ist die Pfeife am anderen Ende offen (Fig. 50), so bildet sich auch an diesem aus dem gleichen Grunde ein Wellenbauch und folglich zunächst ein Knoten und zwar in der Mitte der Pfeife, der ihrem Grundtone entspricht. Deshalb ist die Wellenlänge des Grundtones doppelt so gross wie die Länge l der Pfeife, folglich seine Schwingungszahl (nach 48. 3) $n = v : 2l$, wenn v die Geschwindigkeit des Schalles ist.

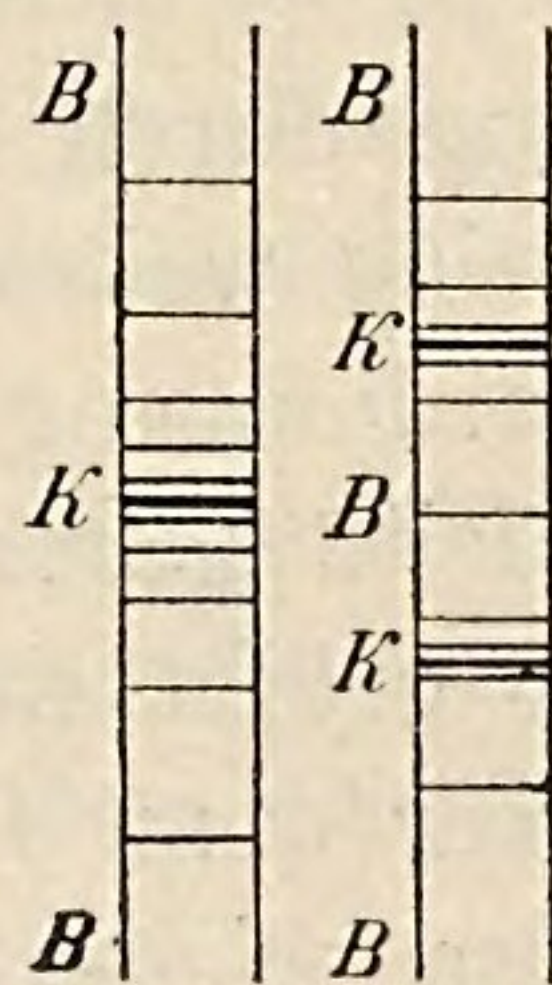


Fig. 50.

Ist dagegen die Pfeife am anderen Ende gedeckt (Fig. 51), so werden an diesem die Luftteilchen von den ursprünglichen und den zurückgeworfenen Wellen fortwährend im entgegengesetzten Sinne bewegt und bleiben also in ihrer Gleichgewichtslage; es entsteht daher an diesem Ende ein Knoten; die Wellenlänge des Grundtones ist daher viermal so gross als die Länge l der Pfeife und seine Schwingungszahl $n' = v : 4l'$. Ist demnach $l = l'$, so ist $n = 2.n'$; soll dagegen $n = n'$ sein, so muss $l = 2l'$ sein. Bei verstärktem Anblasen bilden

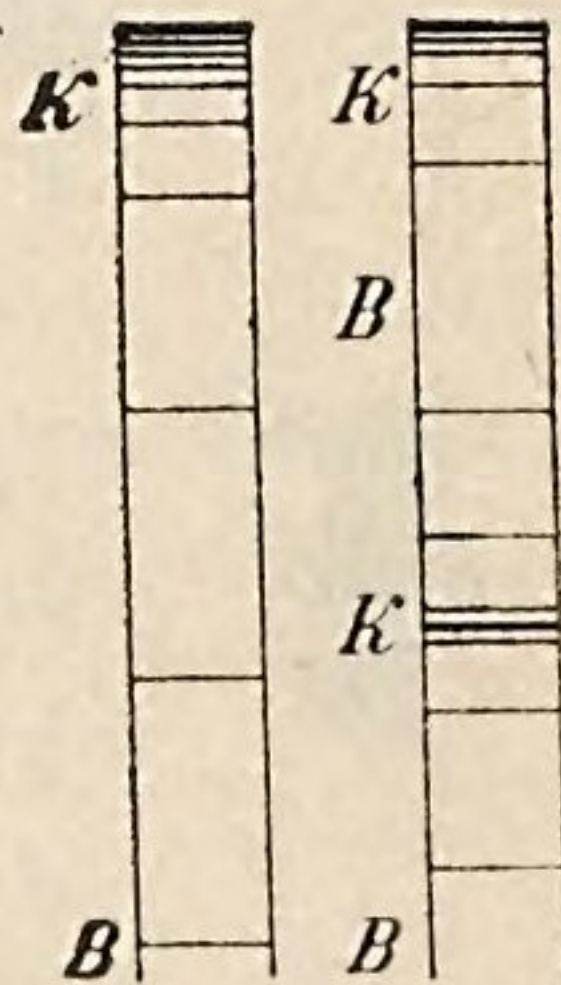


Fig. 51.

sich bei beiden Arten von Pfeifen statt eines Knotens deren zwei, dann drei u. s. w.; es entstehen also Töne von kleinerer Wellenlänge und demgemäss grösserer Höhe.

56. Lippenpfeifen. Zungenpfeifen.

Zur Erzeugung der notwendigen Verdichtungen und Verdünnungen der Luft an dem einen Ende der Pfeife muss an diesem eine besondere Vorrichtung angebracht sein; je nach der Beschaffenheit derselben unterscheidet man Lippen- und Zungenpfeifen.

Bei den Lippenpfeifen befindet sich am unteren Ende, dem Fusse *F* (Fig. 52), ein Spalt, der Mund *M*; oberhalb des

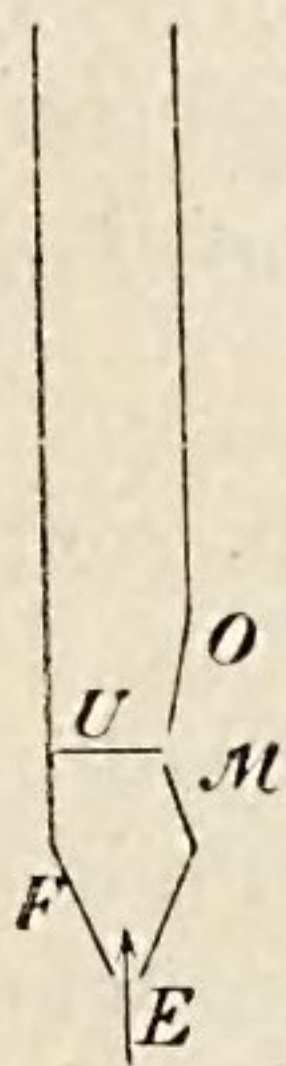


Fig. 52.

Mundes ist die Pfeife etwas nach innen abgeschrägt (Oberlippe *O*); unterhalb derselben ist in dem Rohre eine Platte angebracht (Unterlippe *U*), welche dasselbe bis auf eine schmale Ritze schliesst. Wird nun durch das untere Ende *E* der Pfeife Luft eingeblasen, so dringt sie durch diese Ritze an der Oberlippe vorüber in den oberhalb des Mundes befindlichen Teil und erzeugt dort und zwar zunächst unmittelbar am Munde selbst eine Luftverdichtung; diese hindert ein weiteres Eintreten der Luft, welche nun durch den Mund ins Freie gelangt. Da nun aber einerseits keine weitere Luft in die Pfeife gelangt, andererseits die Luftverdichtung infolge der Störung des Gleichgewichtes in der Pfeife gegen das obere Ende derselben hin fortrücken muss, so ergibt sich im nächsten Augenblicke eine Luftverdünnung ober dem Munde; diese gestattet ein neues Eindringen der Luft, also wiederum Luftverdichtung und der sich auf diese Weise



Fig. 53.

ergebende beständige Wechsel von Luftverdichtung und Luftverdünnung gibt Anlass zur fortwährenden Bildung fortschreitender Wellen. Lippenorgelpfeife, Flöte.

Bei den Zungenpfeifen kann die eingeblasene Luft das Rohr seitlich nicht verlassen. Das Mundstück besteht bei ihnen aus einer Röhre *R* von halb-kreisförmigem Querschnitte, deren ebene Seitenwand durch ein elastisches, an der einen Basis befestigtes Plättchen, die Zunge *Z* (Fig. 53) geschlossen werden kann. Passt die Zunge so in die seitliche Öffnung, dass

sie in die Röhre hineinschwingen kann, so heisst sie durchschlagend, kann sie nur nach aussen schwingen, aufschlagend. Da nun die eingeblasene Luft zunächst die Zunge und diese die in der Pfeife befindliche Luft in Schwingungen versetzt, so entstehen bei diesen Pfeifen zwei Töne, einer durch die Zunge, der andere in der Pfeife; damit diese übereinstimmen, muss die Pfeife eine solche Länge erhalten, dass die Schwingungszahl des in ihr entstehenden Tones der des Zungentones gleich ist.

Zungenorgelpfeife, Klarinette, Oboe, Fagott.

Bemerkung. Die Klappen an den Blasinstrumenten erzeugen eine Änderung der Tonhöhe, weil beim Öffnen derselben an ihrer Stelle ein Schwingungsbauch entsteht.

57. Mittönen (Resonanz).

Versuche. Der Ton einer Stimmgabel, welche angeschlagen und dann in freier Hand gehalten wird, ist schon in geringer Entfernung kaum mehr wahrnehmbar; setzt man aber ihren Stiel, während sie schwingt, auf ein hohles Kästchen oder nur auf einen Tisch, so ergibt sich ein kräftiger Ton.

Wird von zwei gleichgestimmten Stimmgabeln die eine in Schwingungen versetzt, so gibt auch die andere einen Ton, wenn sie sich in der Nähe der ersteren befindet; die Erscheinung zeigt sich noch deutlicher, wenn beide Gabeln auf passend gewählten Kästchen aufgestellt sind und lässt sich dann mittelst eines Pendelchens sichtbar machen.

Sind auf einem Monochorde zwei Saiten von gleicher Tonhöhe aufgespannt und wird die eine zum Tönen gebracht, dann aber schnell am Schwingen verhindert, so hört man die andere tönen.

Die Schwingungen eines tönenden Körpers werden durch die Luft auf andere Körper übertragen und veranlassen diese zum Mittönen, wenn sie selbst angeregt den gleichen Ton erzeugen würden.

Töne lassen sich also mittelst Übertragung auf mittönende Körper (Resonanzböden) verstärken, weil nach 50. die Tonstärke mit der Masse des den Ton erzeugenden Körpers wächst.

58. Gehör- und Sprachorgan.

Unser Gehörorgan hat den Zweck, den Schall bis zum Gehörnerven fortzupflanzen. Der Schall wird durch die Ohr-

muschel aufgefangen und durch den Gehörgang hindurch zum Trommelfell geleitet, welches er in Schwingungen versetzt; die an demselben befestigten Gehörknöchelchen der Paukenhöhle übertragen dieselben auf das ovale Fenster des mit der Gehörflüssigkeit gefüllten Labyrinths, mittelst welcher sich diese Schwingungen zu den feinen Nervenfasern (Cortische Fasern) fortpflanzen, in welche der Gehörnerv ausläuft.

Einen Ton, der weniger als etwa 30 oder mehr als ungefähr 30 000 Schwingungen macht, kann unser Ohr nicht mehr wahrnehmen.

Das menschliche Sprachorgan ist eine Zungenpfeife; die Luft wird aus der Lunge durch die Luftröhre in den Kehlkopf geblasen, einen Knorpel, der durch die Stimmbänder bis auf eine feine Spalte, die Stimmritze, geschlossen ist. Die Luft versetzt die Stimmbänder in Schwingungen, welche den Ton erzeugen. Die Rachen- und Mundhöhle vertreten die Pfeifenröhre. Vorzugsweise die Stellung der Zunge, aber auch die Zähne und die Lippen beeinflussen die sogenannte Klangfarbe des Tones; seine Stärke und zum Teile auch seine Höhe hängen von der Stärke des Luftstromes ab, der aus der Lunge kommt.

Vierter Abschnitt.

Von der Wärme.

A. Ausdehnung der Körper, Änderung ihres Aggregatzustandes durch die Wärme.

59. Wärmegrade. Das Thermometer.

Erfahrung. Berühren wir einen Körper mit der Hand, so erregt er in den Gefühlsnerven derselben eine Empfindung, derzufolge wir den Zustand, in dem er sich befindet, als seinen Wärmezustand bezeichnen; wir unterscheiden verschiedene Grade desselben und bezeichnen diese zunächst als heiss, warm, lau, kalt. Die Ursache dieses Zustandes heisst Wärme.

Ein Körper wird erwärmt, d. h. es wird ihm Wärme zugeführt, wenn man ihn mit einem anderen Körper in Berührung bringt, der wärmer ist als er selbst.

Versuch. Eine Metallkugel, welche sich unter gewöhnlichen Verhältnissen eben noch durch einen Metallring hindurchschieben lässt, bleibt, wenn sie entsprechend erwärmt wird, auf dem Ringe liegen; nach einiger Zeit fällt sie wieder hindurch.

Füllt man eine Glasröhre, welche an dem einen Ende kugelförmig erweitert, an dem anderen Ende aber offen ist, mit einer Flüssigkeit und erwärmt diese, so steigt die Flüssigkeit in der Röhre, fällt aber wieder, wenn ihre Wärme abnimmt.

Taucht man das offene Ende einer ebenso gestalteten, mit Luft gefüllten Röhre unter Wasser und umfasst die Kugel mit der Hand oder lässt eine Flamme über dieselbe hinstreichen, so steigen aus der Röhre Luftblasen in dem Wasser auf; wird die Erwärmung unterbrochen, so steigt das Wasser in der Röhre empor.

Wärmezunahme erhöht daher (im allgemeinen) den Rauminhalt eines Körpers, Wärmeabnahme vermindert ihn.

Die Zunahme oder Abnahme des Volumens eines Körpers ist also ein Mass für seinen Wärmezustand oder auch für den eines anderen Körpers, mit dem er in Berührung steht.

Auf diesem Gesetze beruht die Einrichtung des Thermometers, eines Instrumentes, welches dazu dient, die Temperatur, d. h. den Wärmezustand der Körper zu messen.

Es besteht (Fig. 54) aus einer Glasröhre mit fadendünnem Hohlraume, deren eines Ende sich zu einer Kugel erweitert,

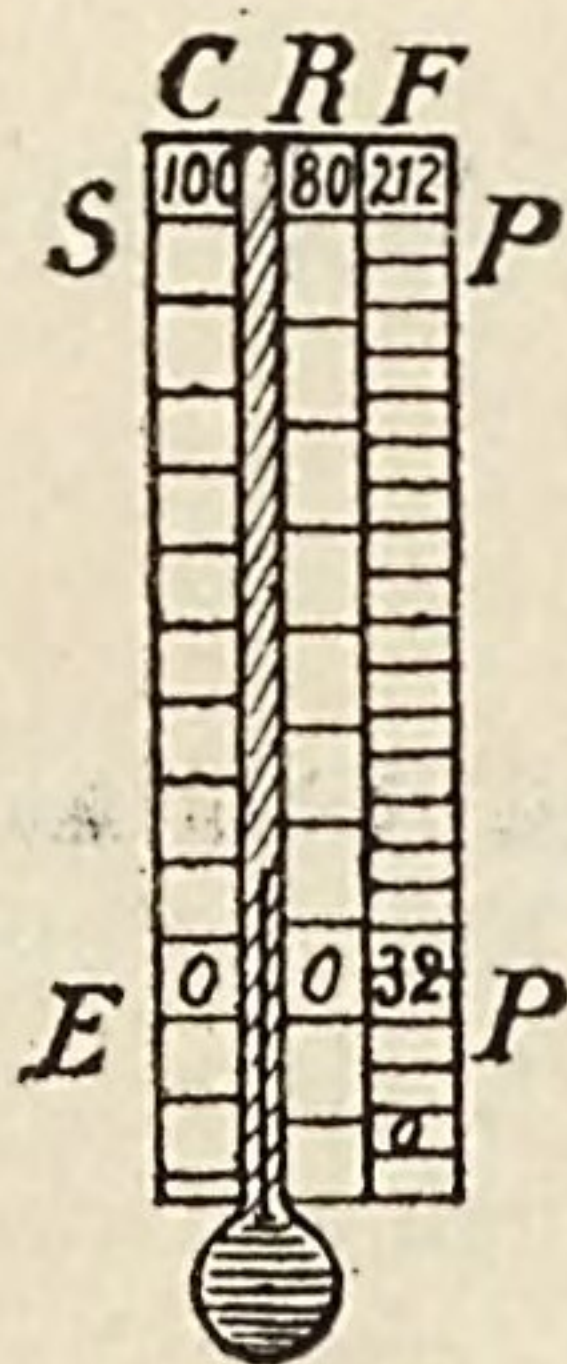


Fig. 54.

während das andere geschlossen ist; die Kugel und ein Teil der Röhre sind mit einer Flüssigkeit gefüllt, der übrige Teil der letzteren aber luftleer, damit sich die Flüssigkeit unbehindert nach oben ausdehnen kann. Das Instrument besitzt zwei feste Punkte, bis zu welchen die Flüssigkeit bei bestimmten, jederzeit herstellbaren Temperaturen steigt; der Zwischenraum zwischen diesen Punkten wird in eine beliebige Anzahl von Teilen geteilt, welche man Grade nennt.

An dem jetzt bei wissenschaftlichen Beobachtungen gebräuchlichen Thermometer nach Celsius ist der eine feste Punkt, an welchem die Flüssigkeit im Instrumente steht, wenn es in gefrierendes Wasser getaucht ist, mit 0 bezeichnet; an dem anderen, welcher die Temperatur siedenden Wassers angibt, steht die Zahl 100.

Réaumur setzte an den Eispunkt ebenfalls die Zahl 0, an den Siedepunkt aber 80, weil er fand, dass sich Weingeist zwischen diesen beiden Temperaturen um 80 $\frac{1}{100}$ seines Volumens ausdehnt.

Fahrenheit wählte als Nullpunkt denjenigen, an welchem die Flüssigkeit im Thermometer steht, wenn dieses sich in einer Mischung von Schnee und Salmiak befindet, als zweiten festen Punkt nahm er den, welcher die Temperatur des menschlichen Körpers angibt, und bezeichnete ihn mit 96. Bei dem Thermometer von Fahrenheit hat der Gefrierpunkt des Wassers die Zahl 32 und der Siedepunkt 212.

Es sind also $(212 - 32)^\circ \text{F} = 180^\circ \text{F} = 80^\circ \text{R} = 100^\circ \text{C}$; daher

$$a^\circ \text{R} = \frac{5}{4} a^\circ \text{C} = \left(\frac{9}{4} a + 32\right)^\circ \text{F}.$$

$$b^\circ \text{C} = \frac{4}{5} b^\circ \text{R} = \left(\frac{9}{5} b + 32\right)^\circ \text{F}.$$

$$c^\circ \text{F} = \frac{4}{9} (c - 32)^\circ \text{R} = \frac{5}{9} (c - 32)^\circ \text{C}.$$

Für höhere und tiefere Temperaturen wird die Teilung über die beiden festen Punkte hinaus fortgesetzt; die Grade unterhalb des Nullpunktes werden mit dem Zeichen — (minus) versehen.

Bemerkungen. Als Flüssigkeit wendet man bei Thermometern fast ausschliesslich Quecksilber oder Weingeist an; ersteres hat den Vorzug, dass es sich sehr regelmässig ausdehnt, weshalb die Teilstriche bei Quecksilberthermometern sämtlich gleichweit abstehen.

Quecksilberthermometer sind nur für Temperaturen von etwa $+250^{\circ}\text{C}$ bis -35°C , Weingeistthermometer von etwa $+60^{\circ}$ bis -75°C brauchbar, weil ausserhalb dieser Grenzen die Ausdehnung ihrer Flüssigkeiten ganz unregelmässig wird. Zur Messung sehr hoher Temperaturen bedient man sich entweder des Luftthermometers (siehe 60 c. Bem. 2) oder des Pyrometers, das in seiner einfachsten Gestalt aus einer Metallstange besteht, deren Ausdehnung durch einen Zeiger sichtbar gemacht wird.

Luftleer werden Thermometer dadurch gemacht, dass man die Kugel und einen Teil der Röhre durch das noch offene Ende derselben mit der Flüssigkeit füllt, dann dieselbe so lange erwärmt, bis sie zu diesem Ende aufgestiegen ist; in diesem Augenblicke wird das bisher offene Ende zugeschmolzen, die erkaltende Flüssigkeit zieht sich zurück und der über ihr befindliche Teil der Röhre ist luftleer.

Auch aus Metallen werden Thermometer hergestellt; zwei schmale Streifen von Metallen, welche verschiedene Ausdehnbarkeit besitzen, werden aneinander geschweisst und in Form einer Spirale aufgehängt; mit dem Steigen und Fallen der Temperatur tritt eine stärkere oder schwächere Krümmung dieser Spirale ein, welche in ähnlicher Weise wie beim Aneroidbarometer durch einen beweglichen Zeiger sichtbar gemacht wird.

Ein Thermometer, welches die höchste innerhalb einer gewissen Zeit vorhanden gewesene Temperatur angibt, heisst Maximumthermometer, ein solches, welches die tiefste Temperatur ersichtlich macht, Minimumthermometer. Ersteres ist ein Quecksilberthermometer, in welchem das Quecksilber bei seiner Ausdehnung ein Stahlstäbchen vor sich herschiebt, das beim Zurückziehen des Quecksilbers an der Stelle der höchsten Temperaturangabe liegen bleibt; letzteres ist ein Weingeistthermometer, in welchem der Weingeist ein Glasstäbchen beim Zurückweichen infolge der nach innen gerichteten Oberflächenspannung mit sich zieht, bei seiner Ausdehnung aber an der Stelle des Minimums liegen lässt.

Eine Vereinigung dieser beiden Thermometer ist der Thermometrograph von Six (Fig. 55). Er besteht aus

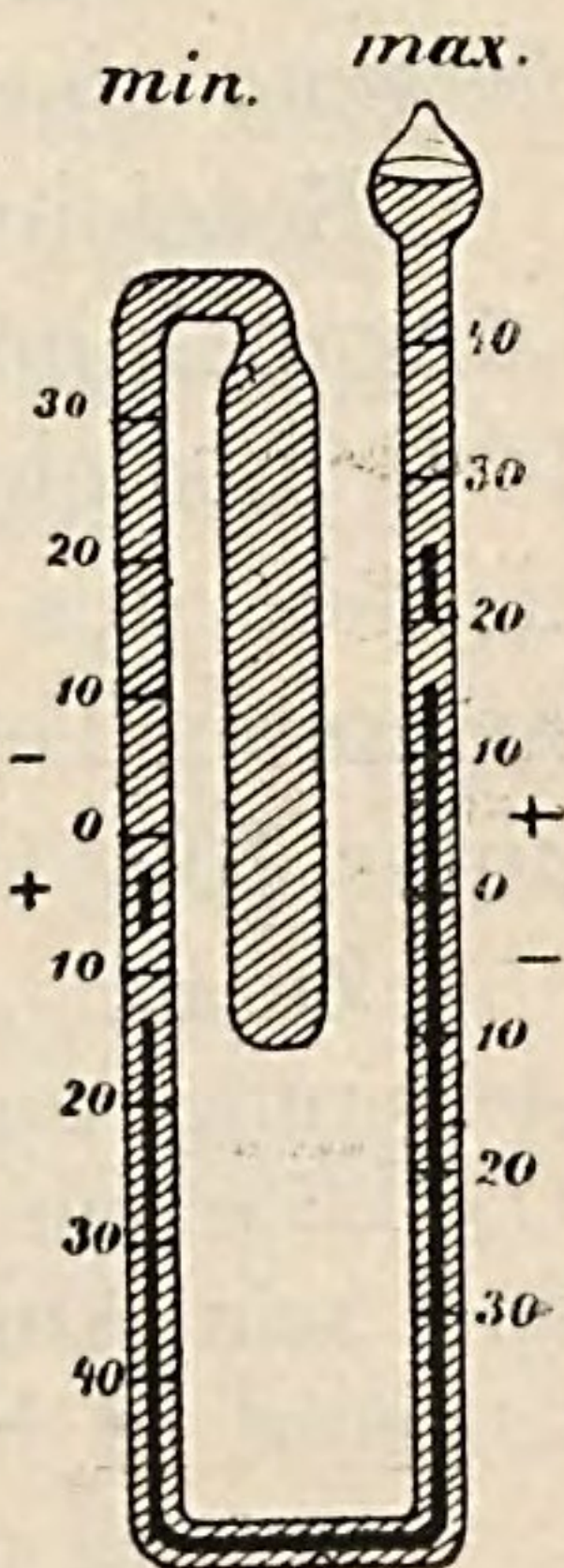


Fig. 55.

einer kommunizierenden Röhre, deren eines Ende umgebogen ist, deren anderes Ende eine birnenförmige Erweiterung trägt; unten ist die Röhre mit Quecksilber gefüllt, der übrige Teil mit Alkohol; nur die Birne ist in ihrer oberen Hälfte leer. Dehnt sich der Weingeist aus, so drückt er das Quecksilber in dem am umgebogenen Ende befindlichen Schenkel hinab, im anderen aber steigt es, weil der Weingeist in die Birne fließen kann; zieht sich der Weingeist zusammen, so steigt das Quecksilber im ersteren Schenkel, während es im letzteren fällt. Maximum und Minimum werden durch Stahlstäbchen angegeben, welche der Quecksilberfaden an beiden Enden vor sich herschiebt.

60. Beziehungen zwischen dem Volumen der Körper und ihrer Temperatur.

a) Feste Körper.

Versuch. Ein Metallstab AB (Fig. 56) wird so auf zwei Stützen gelegt, dass sich das eine Ende desselben gegen ein

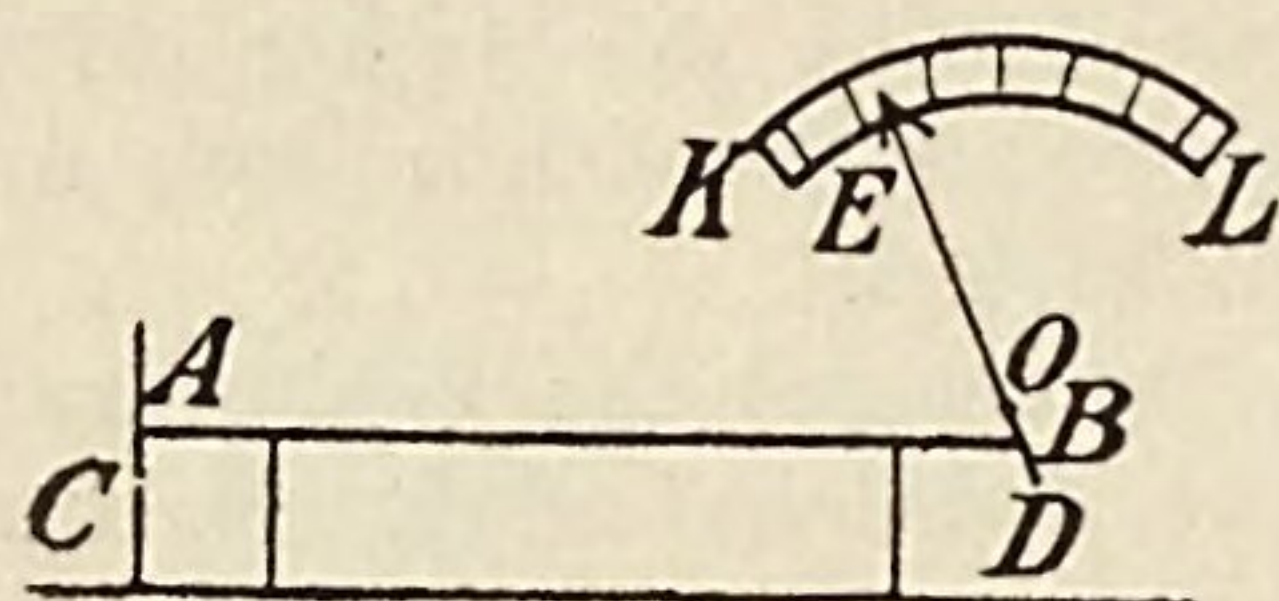


Fig. 56.

festes Widerlager C stemmt, während das andere Ende B den einen Arm eines Hebels DE berührt; wird der Stab erwärmt, so dehnt er sich aus und dreht dadurch den Hebel um einen Winkel, der mittelst des Zeigers E an einem Kreisbogen KL

abgelesen werden kann. Die Temperatur des Stabes wird dadurch bestimmt, dass man die ganze Vorrichtung in ein Gefäß bringt, das mit Wasser gefüllt ist und die Temperatur des letzteren an Thermometern abliest.

Bei Temperaturen zwischen 0 und 100°C ist die Längenausdehnung eines Metallstabes seiner Temperaturzunahme proportional.

Bezeichnet man daher die Strecke, um welche sich die Längeneinheit eines Stabes bei einer Temperaturzunahme von 1°C ausdehnt mit k — man nennt sie den Ausdehnungskoeffizienten des Stabes — so hat ein Stab, welcher bei einer bestimmten Temperatur l (m) lang ist, bei einer um t° höheren, aber unter 100°C liegenden Temperatur die Länge $l' = l(1 + kt)$ (m).

Zusatz. Dreht sich der oben genannte Zeiger bei einer Temperatursteigerung von $t^{\circ} \text{C}$ um den Winkel α und ist (anfangs) der Hebelarm $OB = a$ cm, so beträgt die Längenausdehnung des Stabes $a \tan \alpha$ und sein Ausdehnungskoeffizient ist $k = a \tan \alpha : (lt)$; der Wert des letzteren ist beispielsweise für

Platin $0,0000856$
Glas $0,0000861$

Gusseisen $0,00001110$
Kupfer $0,00001717$

Silber $0,00001909$
Blei $0,00002848$

Bei Temperaturen, welche über 100°C liegen, wächst aber die Längenausdehnung der Metallstäbe rascher, als die Temperaturzunahme.

Ein (rechteckiger) Körper, dessen Dimensionen bei einer bestimmten Temperatur a, b, c (m) sind, dessen Inhalt also $v = abc$ (cbm) beträgt, hat nach dem Obigen bei einer um $t^{\circ}\text{C}$ höheren Temperatur, vorausgesetzt dass diese unter 100°C liegt, den Inhalt $v' = a(1 + kt)b(1 + kt)c(1 + kt) = abc(1 + kt)^3$, oder da k eine sehr kleine Zahl ist $v' = v(1 + 3kt)$.

b) Flüssige Körper.

Versuche zur Bestimmung der Ausdehnung von Flüssigkeiten durch Wärme werden mit Glasgefässen gemacht, welche in eine feine Spitze ausmünden, damit die mit der Erwärmung an Volumen zunehmende Flüssigkeit abfliessen kann; die Volumina werden durch Wägung bestimmt.

Die Ausdehnung der Flüssigkeiten ist grösser als die fester Körper; ihr Ausdehnungskoeffizient, also die Grösse, um welche die Volumeneinheit bei einer Temperaturzunahme von 1°C wächst, ist bei höheren Temperaturen grösser als bei niederen.

Am regelmässigsten dehnt sich, wie schon unter 59 erwähnt wurde, bei nicht zu hoher Temperatur das Quecksilber aus und annähernd regelmässig auch Alkohol.

Versuch. Ein Reagenzgläschen wird mit Wasser von etwa 10°C gefüllt und dann mit einem Kork verschlossen, durch welchen ein feines Glasröhrchen geschoben ist, so dass das Wasser in diesem bis zu einer bestimmten Höhe reicht; stellt man nun das Reagenzglas in Eis, so kühlt sich das Wasser allmählich ab und zieht sich zunächst in dem Röhrchen zusammen; nach einiger Zeit dehnt es sich aber, obwohl die Temperatur weiter abnimmt, wieder aus.

Genauere Messungen haben ergeben, dass Wasser bei $+4,2^{\circ}\text{C}$ den kleinsten Raum einnimmt, also seine grösste Dichte besitzt; zwischen $+4$ und 0°C dehnt es sich fast ebenso aus, wie zwischen $+4$ und $+8^{\circ}\text{C}$; oberhalb dieser letzteren Temperatur dehnt es sich mit zunehmender Wärme immer stärker aus.

Bemerkungen. Diese Erscheinung ist einer der Gründe, weshalb Wasser als Flüssigkeit bei Thermometern nicht brauchbar ist; die Wassersäule hätte bei 4°C ihren tiefsten Stand und stünde bei den Temperaturen $+3$, $+5$, dann $+2$, $+6$ u. s. w. nahezu gleich hoch.

Andererseits ist aber diese Eigenschaft des Wassers in der Natur von grösster Wichtigkeit, weil sie das vollständige Gefrieren der Seen bis auf den Grund und damit die Vernichtung der in denselben lebenden Wesen verhindert. Ist nämlich die Temperatur der Luft, also auch an der Oberfläche des Wassers bis auf $+4^{\circ}\text{C}$ gesunken, so sinken die obersten Schichten des Wassers, welche zunächst diese Temperatur annehmen, infolge der grössten Dichtigkeit in die Tiefe, andere steigen auf, werden auf $+4^{\circ}$ abgekühlt, sinken wieder unter u. s. w., bis der ganze See diese Temperatur besitzt. Bei weiterer Temperaturabnahme bleiben die kühleren Wasserschichten oben und die Eisbildung beginnt an der Oberfläche des Wassers.

c) Gasförmige Körper.

Versuche. Um die Ausdehnung der Luft durch Wärme zu untersuchen, bedient man sich einer Glaskugel, welche in eine Glasröhre ausmündet; in letzterer befindet sich ein Tropfen Quecksilber, der ein bestimmtes Volumen Luft absperrt; wird die Luft in der Kugel erwärmt, so schiebt sie den Quecksilbertropfen gegen die Öffnung der Glasröhre hin. Soll die Ausdehnung der Luft gemessen werden, so muss das Volumen der Glaskugel sowie der Querschnitt der Glasröhre bekannt sein; genauere Untersuchungen werden an einem Apparate gemacht, der sich von dem Mariotteschen (siehe 43) nur dadurch unterscheidet, dass die Glasröhre *B* in ein luftdicht verschlossenes, kugelförmiges Gefäss ausmündet; diese ergaben das Gesetz:

Die Volumenzunahme eines Gases ist bei gleichbleibendem Drucke der Temperaturzunahme proportional; der Ausdehnungskoeffizient ist für alle Gase nahezu der gleiche und beträgt $\alpha = 0,00367 = 1/273$.

Hat also ein Gas bei einer bestimmten Temperatur das Volumen v , so hat es unter dem gleichen Drucke bei einer um $t^{\circ}\text{C}$ höheren Temperatur den Inhalt $V = v(1 + \alpha t)$.

Bleibt nun diese letztere Temperatur ungeändert, geht aber der Druck von p in p' über, so muss es das Volumen v' annehmen, welches sich nach dem Mariotteschen Gesetze (43) aus der Gleichung $p'v' = pV$ ergibt; zwischen dem Volumen v , welches ein unter dem Drucke p stehendes Gas bei einer bestimmten Temperatur einnimmt und dem Volumen v' , den es bei einer um t° höheren Temperatur unter dem Drucke p' hat, besteht also die Beziehung

$$p'v' = p v (1 + \alpha t); \text{ (Gay-Lussac-Mariottesches Gesetz).}$$

Zusatz 1. Ist $v' = v$, so ist $p' = p (1 + \alpha t)$; die Druckzunahme eines Gases ist also bei gleichbleibendem Volumen der Temperaturzunahme proportional.

Zusatz 2. Die obige Gleichung kann auch in der Form $p'v' = pv\alpha (1/\alpha + t)$, oder wenn man $1/\alpha + t = 273 + t = T$ setzt, $p'v' = pv\alpha T$ geschrieben werden; $273 + t = T$ setzen heisst aber nichts anderes, als die Temperatur von einem Punkte auszählen, der 273° unter dem Gefrierpunkte des Wassers liegt; diesen Punkt nennt man den absoluten Nullpunkt und die von ihm aus gemessene Temperatur die absolute Temperatur.

Ist nun $p' = p$, so wird $v' = v\alpha T$; und ist $v' = v$, so wird $p' = p\alpha T$; daher die Sätze:

Das Volumen eines Gases ist bei gleichbleibendem Drucke seiner absoluten Temperatur proportional; der Druck eines Gases ist bei gleichbleibendem Volumen seiner absoluten Temperatur proportional.

Bemerkungen. 1. Da sich mit der Wärme das Volumen der Körper ändert, so erleidet auch, namentlich bei Flüssigkeiten und Gasen, das spezifische Gewicht derselben Änderungen; spezifische Gewichtsbestimmungen müssen also, wenn sie genau sein sollen, auf eine Normaltemperatur — gewöhnlich 4°C — bezogen werden; ist z. B. p das Gewicht einer Flüssigkeit, v_0 ihr Volumen bei 4°C , v das bei $t^{\circ}\text{C}$, s_0 und s ihre entsprechenden spez. Gewichte, so ist $s_0 = p : v_0$; $s = p : v$; da nun $v = v_0(1 + \alpha t)$ ist, so ist $s_0 = s(1 + \alpha t)$.

Auch der Barometerstand ist auf eine Normaltemperatur zu reduzieren; beträgt er bei $t^{\circ}\text{C}$ etwa b mm, so beträgt er bei 0°C unter sonst gleichen Umständen $b_0 = b : (1 + 0,000181 t)$ mm, weil 0,000181 der Ausdehnungskoeffizient des Quecksilbers ist.

2. Der oben erwähnte, modifizierte Mariottesche Apparat dient auch als Thermometer (Luftthermometer); er ermöglicht die feinsten Messungen, weil Luft sich wesentlich leichter ausdehnt als Flüssigkeiten.

61. Schmelzen fester Körper, Erstarren von Flüssigkeiten. Kältemischungen.

Versuch. Ein Gefäss sei mit gestossenem Eise gefüllt und in dieses ein Thermometer gesteckt; führt man dem Eise nun Wärme zu, so fängt dasselbe zu zerfliessen an, das Thermometer bleibt aber so lange auf dem — deshalb so genannten — Eispunkte stehen, bis die ganze Eismenge geschmolzen ist; bei demselben Punkte bleibt aber das Thermometer auch stehen, wenn Wasser gefriert. Dieselbe Erscheinung zeigen auch alle

anderen Körper, wie etwa Wachs, Schwefel, Metalle und zwar jeder bei einer ganz bestimmten Temperatur.

Jeder Körper geht bei einer ihm eigentümlichen Temperatur aus dem festen in den flüssigen Zustand über und kehrt bei derselben Temperatur aus dem flüssigen in den festen Zustand zurück. Man nennt deshalb diese Temperatur seinen Schmelz- bzw. Erstarrungspunkt.

Beispielsweise ist die Schmelztemperatur für

Quecksilber	—	39° C	Zinn	+	230°	Gold	+	1200°
Eis		0°	Blei	+	330°	Gusseisen	+	1200°
Wachs	+	68°	Silber	+	1000°	Stahl	+	1400°
Schwefel	+	111°	Kupfer	+	1100°	Platin	+	1700°

Zusatz. Mit dem Erstarren eines Körpers ist fast regelmässig eine Volumverminderung verbunden; nur einige Körper, z. B. Eisen und Wasser, dehnen sich beim Erstarren aus, was sich daran erkennen lässt, dass festes Eisen auf flüssigem, Eis auf Wasser schwimmt, dass ferner Wasser beim Gefrieren das Gefäss zersprengt, in dem es eingeschlossen ist. (Bersten der Felsen.)

Der obige Versuch beweist nun ferner, dass der Übergang eines festen Körpers in den flüssigen Zustand Wärmezufuhr erfordert; wird letztere von anderen Körpern her abgehalten, so muss der Körper selbst Wärme abgeben, also seine Temperatur sinken. Diese Erscheinung zeigt sich namentlich bei der Lösung von Salzen in Wasser, sowie bei der Mischung von Salzen mit Eis (Kältemischungen).

Die tiefste Temperatur ergibt sich stets bei der vollständig gesättigten Lösung; sie liegt bei Kältemischungen tiefer als bei Lösungen von Salz in Wasser, weil bei jenen ausser dem Salze auch noch das Eis aus dem festen in den flüssigen Zustand gebracht werden muss.

Die Temperaturerniedrigung einer gesättigten Lösung beträgt bei Chlornatrium 2,5°, Natriumsulfat 6,8°, Chlorcalcium 23,2°. Die tiefste Temperatur, welche man bei einer Kältemischung erreichen kann, beträgt, wenn man die Salzmenge in Prozenten der Eismenge ausdrückt, bei

Kaliumnitrat	10 ⁰ / ₀ —2,9 ⁰	Natriumnitrat	25 ⁰ / ₀ —17,2 ⁰
Zinksulfat	80 ⁰ / ₀ —6,1 ⁰	Chlornatrium	25 ⁰ / ₀ —21,3 ⁰
Chlorkalium	30 ⁰ / ₀ —10,8 ⁰	Chlorcalcium	100 ⁰ / ₀ —37,8 ⁰ .

62. Verdampfen von Flüssigkeiten. Kondensation von Dämpfen.

Versuch. Erwärmt man Wasser, so steigen zunächst einige, dann immer mehr Dampfblasen in demselben auf; bei einer bestimmten Temperatur gerät die ganze Wassermasse ins

Wallen; das Thermometer steigt von da ab nicht mehr, bis die ganze Wassermenge verdampft ist. Wird Wasserdampf abgekühlt, so kehrt er bei derselben Temperatur in den flüssigen Zustand zurück. Gleiches gilt von allen anderen Flüssigkeiten.

Jede Flüssigkeit verdampft bei einer ihr eigentümlichen Temperatur; ihr Dampf kehrt bei derselben Temperatur in den flüssigen Zustand zurück. Man nennt deshalb diese Temperatur ihren Siede- bzw. Kondensationspunkt.

Beispielsweise ist der Siedepunkt für

Kohlensäure . . .	— 80° C	Phosphor . . .	+ 290° C
Äther . . .	+ 35°	Quecksilber . . .	+ 359°
Alkohol . . .	+ 78°	Schwefel . . .	+ 424°
Wasser . . .	+ 100°		

Bemerkung. Die Siedetemperatur hängt jedoch von Nebenumständen ab; die oben angegebenen Siedetemperaturen gelten nur, wenn die betreffende Flüssigkeit unter dem Drucke einer Atmosphäre steht. Der Siedepunkt steigt, wenn der Druck grösser wird, und fällt, wenn sich dieser vermindert; so siedet beispielsweise Wasser unter dem Rezipienten der Luftpumpe schon bei 20° C. Salzlösungen, sowie Wasser, welches organische Substanzen enthält, sieden erst bei höherer Temperatur als destilliertes Wasser. Auch das Gefäss, in welchem sich die Flüssigkeit befindet, ist infolge der Adhäsion von Einfluss auf die Siedetemperatur derselben.

Zusatz. Da der Siedepunkt des Wassers von dem Barometerstande abhängt, so kann er als Mass für den Luftdruck angesehen werden; dementsprechend können also auch Höhenmessungen (siehe 44) mit Hilfe des Thermometers gemacht werden. (Hypsothermometer.)

Bezeichnet b den Barometerstand, t die Siedetemperatur des Wassers, so ist für

$b =$	680	700	720	740	760	780	800	(mm)
$t =$	96,9	97,7	98,5	99,3	100	100,7	101,4	(°C).

Eine besondere Art des Verdampfens ist das Verdunsten, welches sich vom Sieden wesentlich dadurch unterscheidet, dass die Dampfbildung nur an der Oberfläche der Flüssigkeit vor sich geht, während sie beim Sieden in der ganzen Flüssigkeit erfolgt. Die Erscheinung des Verdunstens zeigt sich zuweilen selbst an festen Körpern. (Dampfen des Schnees.) Die Verdunstung ist um so stärker, je höher die Temperatur, je kleiner der Druck und je grösser die Oberfläche des verdunstenden Körpers ist. Wird die zum Verdunsten nötige Wärme dem betreffenden Körper selbst entzogen, so muss seine Temperatur

sinken. Auf diesem Prinzipie beruhen die modernen Eismaschinen.

63. Spannkraft der Dämpfe.

Bringt man in den luftleeren Raum eines barometerartigen Gefäßes einige Tropfen einer leichtverdampfenden Flüssigkeit, etwa Äther, so verdampft dieselbe ganz oder teilweise und drückt dabei das Quecksilber in der Röhre herab. Dampf übt daher, wie Gas, auf die Wände des einschliessenden Gefäßes einen Druck aus, welchen man die Spannkraft des Dampfes nennt (siehe 41); die Differenz der Quecksilberhöhen, in Millimetern gemessen, ist ein Mass für die Spannkraft eines Dampfes.

Wird umgekehrt der Druck des Quecksilbers auf den Dampf durch tieferes Eintauchen der Röhre in Quecksilber erhöht, so nimmt das Volumen des Dampfes ab; Druck und Volumen entsprechen dem Gay-Lussac-Mariotteschen Gesetze, jedoch nur bis zu einer bestimmten Grenze, welche sich mit der Temperatur ändert; übersteigt der Druck diese Grenze, so wird ein Teil des Dampfes flüssig oder, wie man gewöhnlich sagt, der Dampf kondensiert sich. Der Dampf heisst an dieser Grenze gesättigt und der Druck, den er dabei ausübt, das Maximum seiner Spannkraft bei der gegebenen Temperatur. Wird Dampf, welcher bei einer bestimmten Temperatur gesättigt ist, über diese hinaus ohne weitere Dampfzufuhr erhitzt, so besitzt er das Maximum seiner Spannkraft nicht mehr, weil dieses mit der Temperatur steigt, und heisst dann nicht gesättigt oder überhitzt.

Ist die Temperatur eines Dampfes nicht an allen Punkten dieselbe, so ist das Maximum seiner Spannkraft das der tiefsten Temperatur; die Spannkraft der Dämpfe in einem geschlossenen Raume kann daher durch Abkühlung an irgend einer Stelle vermindert werden.

Die Spannkraft verschiedener Dämpfe ist bei gleicher Temperatur nicht gleich; aber die Spannkraft eines jeden Dampfes beträgt bei seinem Siedepunkte eine Atmosphäre; deshalb ist umgekehrt der Siedepunkt einer Flüssigkeit von dem Drucke abhängig, unter dem sie steht (siehe 62).

Weitaus die grösste Rolle sowohl in der Technik als auch im Haushalte der Natur spielt von allen Dämpfen der Wasserdampf; deshalb ist das Verhalten desselben von den bedeutend-

sten Physikern eingehend untersucht worden; dieselben fanden, dass die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes nahezu um einen konstanten Faktor wächst, wenn die Temperatur um einen unveränderlichen Summanden zunimmt.

Beispielsweise beträgt die Spannkraft gesättigter Wasserdämpfe bei

°C	mm	°C	mm	°C	mm	°C	Atmosph.	°C	Atmosph.
10	9 _{,17}	40	54 _{,91}	70	233 _{,09}	100	1	153	5
20	17 _{,39}	50	91 _{,98}	80	354 _{,64}	121	2	182 ⁰	10
30	31 _{,55}	60	148 _{,79}	90	525 _{,45}	135	3	215 ⁰	20

Zusatz 1. Zwischen Dampf und Gas besteht kein wesentlicher Unterschied mehr, seitdem es gelungen ist, auch Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff unter Anwendung sehr tiefer Temperaturen und gleichzeitig sehr hohen Druckes in den flüssigen Zustand überzuführen. Gewöhnlich nennt man Gase solche Dämpfe, welche erst bei einer unter 0° C liegenden Temperatur unter einem stärkeren als dem Atmosphären-drucke flüssig werden. Beispielsweise wird

Kohlensäure	bei	0°	unter einem Drucke von	38 Atmosphären	flüssig
„	„	—40	„	11	„
„	„	—79	„	1 _{,2}	„
Sauerstoff	„	—140	„	320	„
Stickstoff	„	—30	„	300	„
Wasserstoff	„	—140	„	650	„

Doch gibt es für jedes Gas eine Temperatur, oberhalb welcher ein Gas auch unter Anwendung des grössten Druckes nicht mehr flüssig gemacht werden kann; man nennt sie die kritische Temperatur des Gases; sie liegt für Kohlensäure bei + 31°, Äther bei + 196°, Sauerstoff — 118°, Wasserstoff — 174°.

Zusatz 2. Wird auf eine sehr erhitzte Metallplatte ein Tropfen einer Flüssigkeit gebracht, so verdampft derselbe nicht sofort, sondern nimmt eine kugelförmige Gestalt an und dreht sich sehr rasch; nach einiger Zeit verdampft er plötzlich explosiv. Diese Erscheinung, welche unter dem Namen des Leidenfrost'schen Versuches bekannt ist, lässt sich dadurch erklären, dass sich die untersten Schichten des Tropfens bei der plötzlichen Berührung mit der heissen Platte in Dämpfe von sehr hoher Spannung verwandeln, welche eine Berührung der Flüssigkeit und der Platte verhindern. (Kesselexplosionen.) Eine ähnliche Erscheinung ergibt sich, wenn man einen Körper in eine Flüssigkeit von sehr hoher Temperatur taucht, etwa den Arm in flüssiges Metall.

64. Die Dampfmaschinen.

Der Dampf kann durch den Druck, welchen er auf die Wände des ihn absperrenden Gefässes ausübt (63), Bewegung erzeugen, wenn das Gefäss einen beweglichen Verschluss besitzt; diese Wirkung des Dampfdruckes wird bei den Dampf-

maschinen ausgenützt; zu den wesentlichen Bestandteilen derselben gehört der Dampfkessel, in welchem Dampf erzeugt wird, und der Cylinder, innerhalb dessen ein dicht anschliessender, aber doch leicht beweglicher Kolben hin- und zurückgeschoben werden kann.

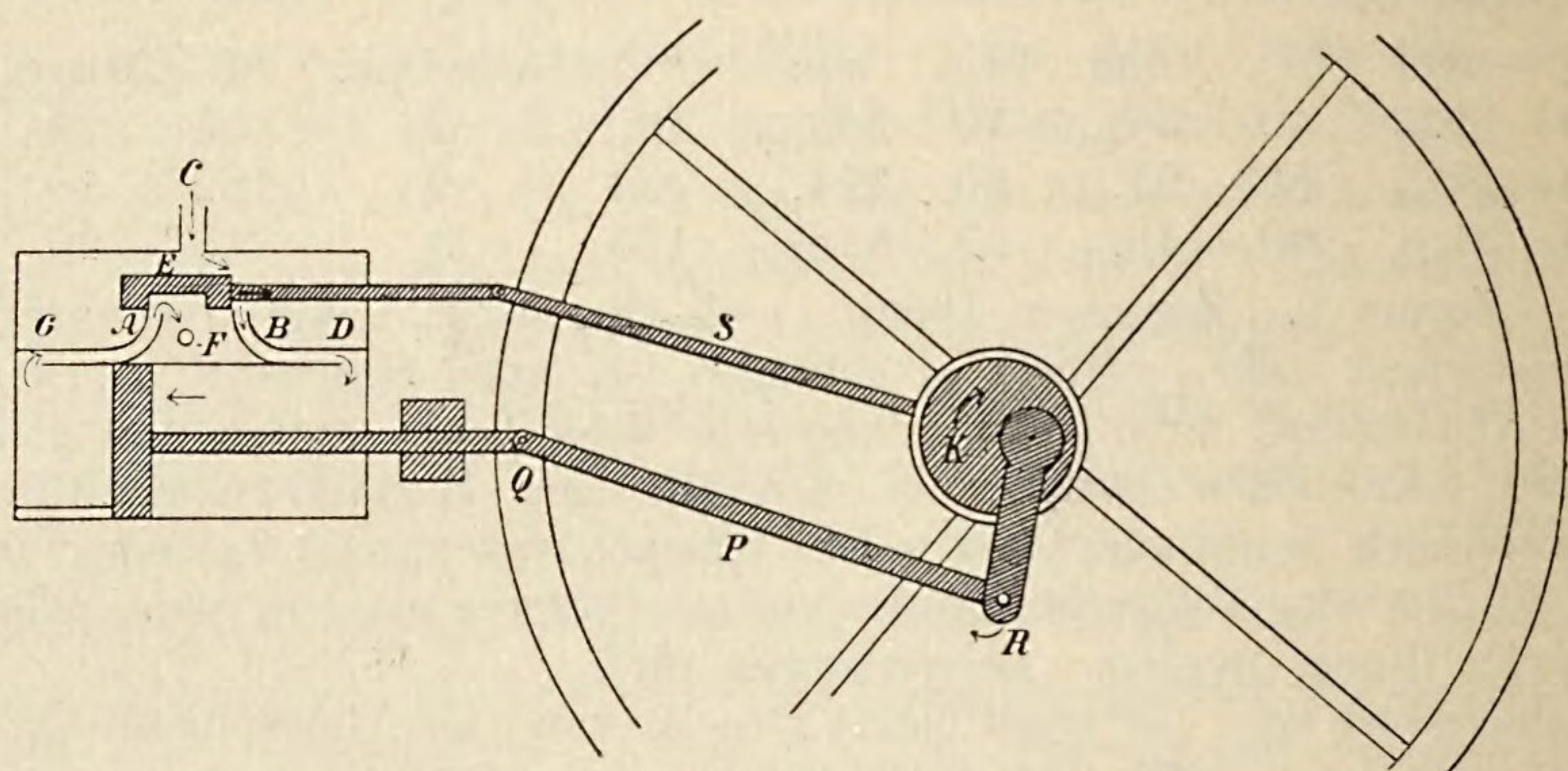


Fig. 57 a.

Am Cylinder ist seitlich die Steuerung angebracht, ein ausgehöhltes Stück Eisen *E* (Fig. 57 *a* und *b*), welches sich so verschieben lässt, dass der aus dem Kessel strömende Dampf wechselweise durch einen der beiden Gänge *BD* und *AG* in den Cylinder gelangt und so immer von der einen Seite her auf den Kolben drückt, während gleichzeitig der Dampf, welcher sich auf der entgegengesetzten Seite des Kolbens befindet, durch den anderen dieser beiden Gänge und das Rohr *F* vertrieben wird.

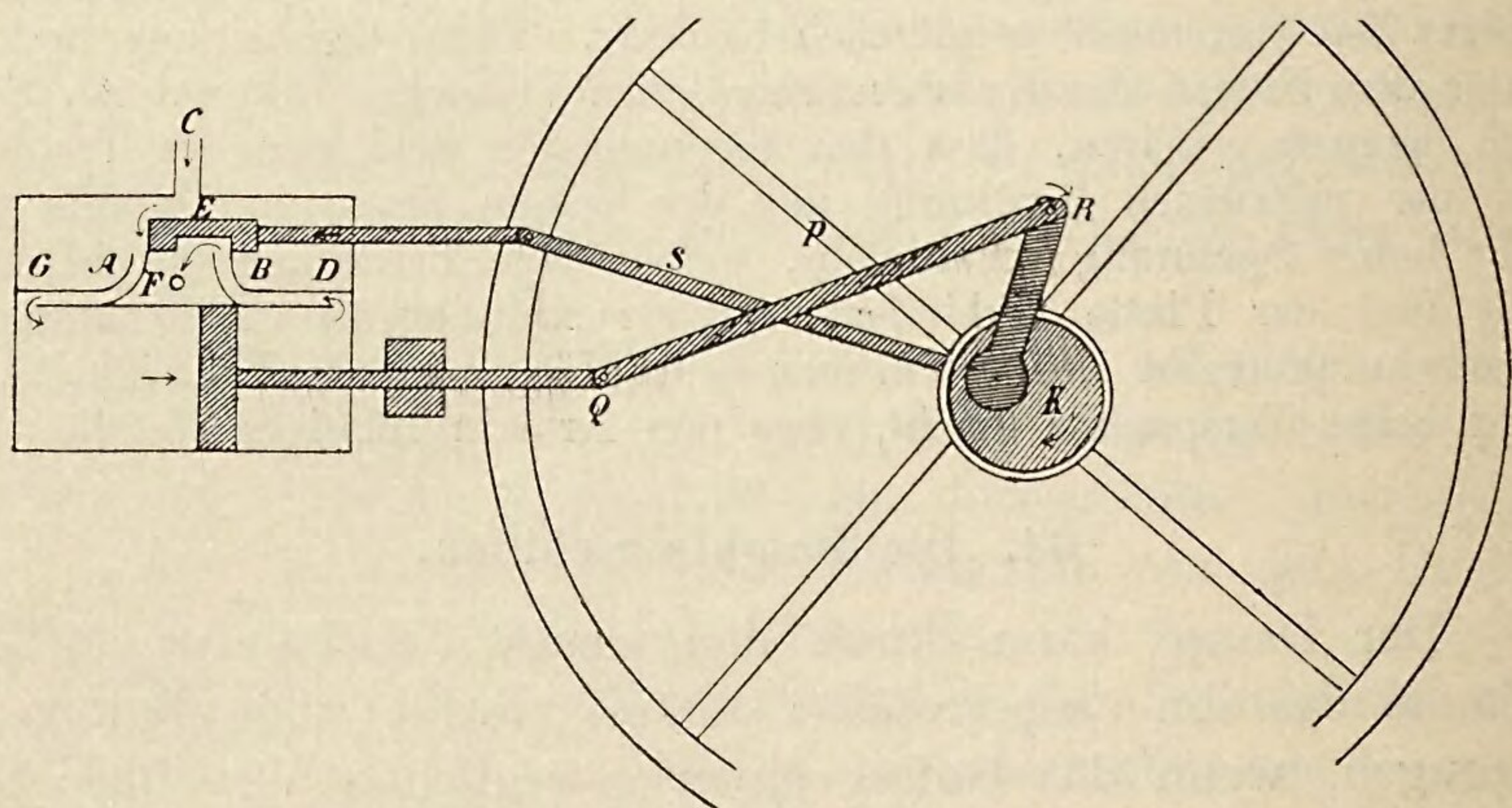


Fig. 57 b.

Die Bewegung der Steuerung besorgt die Maschine selbstwirkend mit Hilfe der sogenannten *Exzentrik*; mit der Achse des Rades ist nämlich eine Kreisscheibe *K* fest verbunden, aber so, dass ihr Mittelpunkt nicht mit dem des Rades zusammenfällt; am Rande derselben ist ein schmaler Reif lose aufgesetzt und dieser durch eine Stange *S* mit der Steuerung verbunden; infolge dessen beschreibt der Mittelpunkt dieser Scheibe bei jeder Drehung des Rades einen Kreis um den Mittelpunkt des letzteren, wodurch der um die Scheibe gelegte Ring und mit diesem die Steuerung in der der Bewegung des Kolbens entgegengesetzten Richtung hin- und herbewegt wird.

Durch das Rohr *F* gelangt der Dampf entweder in den Kondensator, eine Kammer, in welcher der Dampf durch Einspritzung kalten Wassers kondensiert, also wirkungslos gemacht wird, oder er entweicht in die freie Luft; im letzteren Falle muss aber der Dampf im Kessel eine grössere Spannung besitzen als im ersteren, weil er nicht nur den Gegendruck des aus dem Cylinder zu vertreibenden Dampfes, sondern auch den Luftdruck zu überwinden hat. Maschinen mit Kondensator heissen daher Niederdruckmaschinen, solche ohne denselben Hochdruckmaschinen; zu den letzteren gehört die Lokomotive.

An jedem Dampfkessel befindet sich ein Manometer (43) zum Messen des Dampfdruckes, sowie ein Sicherheitsventil, eine Klappe, welche eine Durchbohrung der Kesselwand dampfdicht abschliesst und erst bei einem bestimmten Dampfdrucke sich öffnen kann; zu diesem Zwecke ist das Ventil an einem Punkte *A* eines einarmigen Hebels *BC* (Fig. 58) aufgehängt, an dessen Ende *B* sich ein Gewicht von solcher Grösse befindet, dass sein Drehmoment dem des Dampfdruckes auf das Ventil bei derjenigen Spannung gleich ist, die er im äussersten Falle erlangen darf. Den Dampfzutritt aus dem Kessel in den Cylinder regelt die Maschine selbstthätig durch den Zentrifugalregulator, ein an einer rotierenden Stange befindliches Kugelpaar, das sich je nach der Rotationsgeschwindigkeit von dieser mehr oder weniger entfernt und dadurch mittelst einer Hebelvorrichtung eine im Dampfrohre befindliche Klappe mehr oder weniger schliesst.

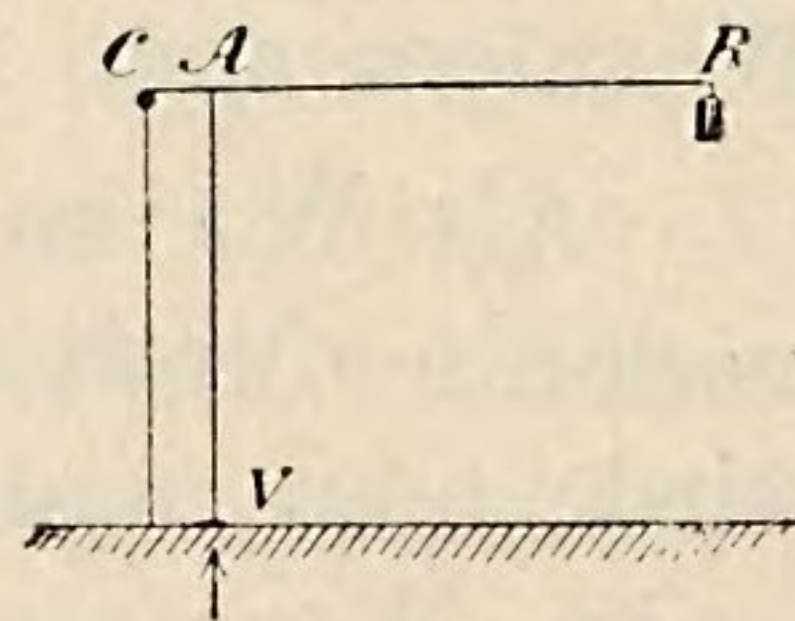


Fig. 58.

Die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens wird mittelst der Pleuelstange QR (Fig. 57) in eine rotierende umgesetzt. Endlich ist an der Dampfmaschine noch ein schweres Rad, das Schwungrad angebracht, welches infolge seines Trägheitsvermögens unvermeidliche Unregelmässigkeiten in der Bewegung des Kolbens ausgleicht; bei der Lokomotive ersetzen die Triebräder seine Stelle.

Statt des Wasserdampfes verwendet man vielfach erhitzte oder komprimierte Luft, auch Leuchtgas. (Heissluft-, Gasmotoren.)

B. Wärmemessung (Kalorimetrie).

65. Wärmeeinheit. Spezifische Wärme.

Versuch. Mehrere Metallkugeln von gleicher Masse, aber verschiedenem Stoffe werden in einem Wasserbade auf die gleiche Temperatur gebracht und dann mittelst eines Drahtes, an dem sie lose aufgesteckt sind, auf eine Wachsplatte gelegt; sie sinken in das Wachs so lange ein, bis sie die Temperatur desselben angenommen haben und zwar um so tiefer, je mehr Masse sie haben und je höher ihre Temperatur war; eine Eisenkugel dringt aber unter sonst gleichen Umständen viel tiefer in das Wachs ein, als eine solche von Kupfer, diese tiefer als eine Zinnkugel; am wenigsten sinkt Blei ein.

Der Versuch zeigt, dass *die Wärmemenge, welche ein Körper abgibt, nicht bloss von seiner Masse und seiner Temperaturabnahme, sondern auch von dem Stoffe abhängt, aus dem er besteht.* Diese drei Bestimmungsstücke müssen also auch bei der Messung von Wärmemengen in Betracht gezogen werden.

Als Wärmeeinheit hat man nun diejenige Wärmemenge gewählt, durch welche 1 kg (bzw. 1 g) Wasser um 1°C erwärmt wird; man nennt sie eine (grosse bzw. kleine) Kalorie. Diejenige Wärmemenge aber, welche nötig ist, 1 kg (1 g) irgend eines Stoffes um 1°C zu erwärmen, nennt man die spezifische Wärme dieses Stoffes. Die spezifische Wärme des Wassers ist daher gleich 1.

Nimmt die Temperatur eines Körpers, welcher a (g) wiegt und dessen spezifische Wärme c ist, um $t^{\circ}\text{C}$ zu oder ab, so nimmt seine Wärme um act Kalorien zu bzw. ab.

Um die spezifische Wärme c eines festen oder flüssigen Körpers zu bestimmen, bringt man ihn, nachdem man sein Gewicht a (g) und seine Temperatur $t^{\circ}\text{C}$ bestimmt hat, in ein Gefäß, welches b (g) Wasser von $t'^{\circ}\text{C}$ enthält (das Kalorimeter) und beobachtet die gemeinsame Temperatur T , welche der Körper und das Wasser nach dem Wärmeausgleich besitzen. War $t > t'$, so gab der Körper an das Wasser $ac(t - T)$ Kalorien ab; dieses nahm um $b(T - t')$ Kalorien an Wärme zu; diese beiden Wärmemengen sind einander gleich; es ist also $ac(t - T) = b(T - t')$ und folglich $c = \frac{b(T - t')}{a(t - T)}$.

Um die spezifische Wärme eines Gases zu finden, lässt man dasselbe durch ein mehrfach gewundenes, innerhalb des Kalorimeters befindliches Rohr streichen und bestimmt die Temperaturzunahme des letzteren.

Die spezifische Wärme beträgt beispielsweise für

Eisen	0,113	Zinn	0,055	Quecksilber	0,033
Kupfer	0,093	Blei	0,032	Luft	0,237

66. Schmelzwärme. Verdampfungswärme.

Schmelzwärme eines Körpers ist diejenige Wärmemenge, welche nötig ist, um 1 kg (bzw. 1 g) desselben aus dem festen in den flüssigen Zustand überzuführen, Verdampfungswärme diejenige, durch welche 1 kg (1 g) einer Flüssigkeit in Dampf verwandelt wird.

Experimentell werden dieselben auf ähnlichem Wege bestimmt, wie die spezifische Wärme der Körper. Um z. B. die Schmelzwärme des Eises zu bestimmen, mischt man a kg Eis von 0°C mit b kg Wasser von $t^{\circ}\text{C}$; dadurch erhält man $(a + b)$ kg Wasser von der Temperatur $T^{\circ}\text{C}$, wobei $T < t$ ist. Ist nun x die Schmelzwärme des Eises, so sind zu seiner Verflüssigung ax Kalorien nötig; die aus demselben entstehende Wassermasse wird ferner noch auf $T^{\circ}\text{C}$ erwärmt, was weitere aT Kalorien erfordert; das warme Wasser gibt aber $b(t - T)$ Kalorien ab; es muss also $ax + aT = b(t - T)$ sein und folglich ist $x = [b(t - T) - aT] : a$ Kalorien.

Auf diese Weise fand man die Schmelzwärme für Eis 79,9, für Zinn 14,25, für Schwefel 9,4, für Quecksilber 2,8 Kalorien.

Um ferner beispielsweise die Verdampfungswärme des Wasserdampfes zu bestimmen, leitet man in ein Gefäß, welches Wasser

enthält, Wasserdämpfe; diese werden durch die Abkühlung flüssig, die Temperatur des Wassers aber steigt. Da nun die von den Dämpfen abgegebene Wärmemenge der vom Wasser aufgenommenen gleich ist, so ergibt sich eine ähnliche Gleichung wie oben, aus der sich die Verdampfungswärme des Wassers berechnen lässt.

Die Verdampfungswärme beträgt für Wasser 536, für Alkohol 210, für Äther 90 Kalorien.

Zusatz. Geht ein Körper aus dem gasförmigen in den flüssigen oder aus diesem in den festen Zustand über, so gibt er so viele Wärmeeinheiten ab, als zu seiner Verdampfung bzw. Verflüssigung nötig sind.

C. Ausbreitung der Wärme. Wärmequellen. Wärmetheorie.

67. Wärmeleitung. Wärmestrahlung.

Versuch. Hält man einen Metallstab, der an irgend einer Stelle mittelst einer Flamme erwärmt wird, an einer anderen Stelle in der Hand, so empfindet diese das Gefühl zunehmender Wärme und zwar um so mehr, je näher die Hand bei der erwärmten Stelle ist und je länger die Erwärmung dauert; bei anderen Körpern wird diese Erscheinung in viel geringerem Grade oder fast gar nicht wahrgenommen.

Wärme breitet sich also in einem Körper von Teilchen zu Teilchen aus; diese Ausbreitung der Wärme heisst Wärmeleitung; je nachdem sie in einem Körper schneller oder langsamer vor sich geht, nennt man ihn einen guten oder schlechten Wärmeleiter. Die besten Wärmeleiter sind die Metalle, unter ihnen vor allem das Silber; dann folgen Kupfer, Zink, Eisen, Blei.

Schlechte Wärmeleiter sind unter den festen Körpern Holz, Glas, Seide, Wolle, Stroh u. s. f. Flüssige Körper leiten die Wärme nur in geringem Grade, gasförmige noch weniger. Um einen Körper vor Wärmeverlusten oder auch vor Wärmeaufnahme zu schützen, umgibt man denselben mit schlechten Wärmeleitern; am zweckmässigsten erweisen sich Luftschichten, welche durch schlecht leitende Zwischenwände getrennt sind. (Kleidung, Winterfenster.)

Versuch. In der Nähe einer Wärmequelle (etwa eines heissen Ofens) sind zwei Thermometer aufgestellt, das eine unbedeckt, das andere gegen die Wärmequelle hin durch einen Schirm geschützt; das unbedeckte Thermometer steigt viel rascher als das bedeckte; seine Erwärmung kann durch Leitung allein nicht erfolgt sein; denn sonst müssten die beiden Thermometer gleich hoch stehen.

Wärme kann einem Körper zugeführt werden, wenn er auch mit der Wärmequelle nicht unmittelbar in Berührung kommt; diese Art von Wärmeausbreitung nennt man Wärmestrahlung; sie geht stets von der Wärmequelle aus nach allen Seiten hin in geraden Linien vor sich; deshalb ist die Wirkung der Wärmestrahlen am grössten, wenn ihre Richtung auf der bestrahlten Fläche senkrecht steht und nimmt um so mehr ab, je kleiner der Winkel zwischen dieser und der Richtung der Strahlen wird.

Manche Körper lassen Wärmestrahlen ganz oder grösstenteils hindurch, z. B. Steinsalz, Luft; diese nennt man diatherman; andere, wie etwa Eis, Wasser, halten Wärmestrahlen fast vollständig in sich zurück; sie heissen adiatherman. Die Wärmedurchlässigkeit eines Körpers hängt auch von der Beschaffenheit seiner Oberfläche ab; ist diese rauh, so strahlt er die Wärme leichter aus, als wenn sie glatt ist.

68. Wärmequellen.

Die Hauptquelle der Wärme ist für uns die Sonne, deren Wärmevorrat zum Teile dem Erdkörper durch Strahlung übermittelt wird.

Die Wärmemenge, welche die Erde von der Sonne jährlich empfängt, ist so gross, dass durch sie eine die ganze Erde umhüllende Eisschicht von 50 m Dicke geschmolzen werden könnte.

Auch der Erdkörper selbst ist eine Wärmequelle; das beweist die Zunahme der Wärme mit der Entfernung von der Erdoberfläche gegen den Erdmittelpunkt hin, sowie die heissen Quellen und Vulkane an verschiedenen Punkten der Erde. An der Erdoberfläche ist aber eine Wirkung dieser Wärmequelle im übrigen nicht wahrnehmbar.

Wärme entsteht ferner bei der Bildung jeder chemischen Verbindung, insbesondere bei den sogenannten Verbrennungsprozessen.

So werden beispielsweise bei Verbrennung von 1 kg Holz 3000, bei Kohle 8000, bei Petroleum 12 000, bei Wasserstoff 34 000 Wärmeinheiten erzeugt.

Bei Kondensation von Dämpfen, Erstarren von Flüssigkeiten wird Wärme frei. (66. Zusatz.)

Jede mechanische Arbeitsleistung, wie Druck oder Stoss, insbesondere aber Reibung (beim Bohren, Sägen, an der Achse der Wagenräder) erzeugt Wärme.

Endlich ist der elektrische Strom eine Wärmequelle.

69. Wärmetheorie.

Über das Wesen der Wärme gibt es zwei Hypothesen; die älteren Physiker betrachteten sie als einen feinen, unwägbaren Stoff, von welchem ein Körper eine bestimmte Menge aufnehmen müsse, um einen bestimmten Wärmegrad zu erreichen. Heutzutage betrachtet man die Wärme als eine bestimmte Art von schwingender Bewegung der Körpermolekeln.

Ausschlaggebend für die letztere Hypothese war insbesondere der Umstand, dass sich das scheinbare Verschwinden der Wärme bei der Änderung des Aggregatzustandes der Körper auf Grund der Stofftheorie ebensowenig erklären liess wie die Thatsache, dass durch mechanische Arbeit Wärme entsteht, während sich beide Erscheinungen durch die Bewegungstheorie in vollständig befriedigender Weise begründen lassen: Beim Schmelzen und Verdampfen versetzt die Wärme die Molekeln der Körper in heftigere Schwingungen, so dass sie von einander weggeschoben werden; umgekehrt werden durch eine mechanische Arbeit auch die kleinsten Teilchen eines Körpers zu Schwingungen veranlasst und diese äussern sich in Form von Wärmezunahme.

Genauere Untersuchungen haben gezeigt, dass eine ganz bestimmte Arbeitsleistung stets der Erzeugung einer ganz bestimmten Wärmemenge entspricht; man hat gefunden, dass durch die Arbeit, welche ein Gewicht von 424 kg bei einem Falle über 1 m leistet, eine Wärmemenge von einer (grossen) Kalorie erzeugt wird. (Mechanisches Äquivalent der Wärme.)

D. Anhang. Grundzüge der Witterungskunde. (Meteorologie.)

70. Bestimmungsstücke des Wetters.

Das Wetter hängt in erster Linie von dem Drucke, der Temperatur und dem Feuchtigkeitsgehalte des Luft-

meeres ab; deshalb beschäftigt sich die Witterungskunde vorwiegend mit der Beobachtung dieser drei Grössen sowie mit der Untersuchung ihrer Änderungen und ihrer gegenseitigen Beziehungen.

Der Luftdruck, welcher mit Hilfe des Barometers (42) gemessen wird, erfährt am gleichen Orte teils regelmässige, teils unregelmässige Änderungen und ist zur gleichen Zeit an verschiedenen Orten von verschiedener Grösse. Ist der Luftdruck an einem Orte geringer als ringsum in seiner Umgebung, so sagen wir, der Ort stehe unter einem barometrischen Minimum; dagegen befindet sich ein Ort, in welchem der Luftdruck grösser ist als an anderen Orten, unter einem Maximum.

Wegen der leichten Verschiebbarkeit der Luftteilchen muss die Luft an der Erdoberfläche von einem Maximum aus nach auswärts, aber gegen ein Minimum hereinströmen; diese Luftströmungen heissen je nach ihrer Stärke Wind, Sturm oder Orkan. Die Bewegung der Luft, welche an sich genommen radial sein müsste, geht wegen der Rotation der Erde in eine spiralförmige über und zwar erfolgt die Ablenkung auf der nördlichen Halbkugel bei einem Minimum nach links, bei einem Maximum nach rechts.

Die Minima, welche niemals an einem Orte stehen bleiben, sondern bald langsamer, bald rascher über die Erdoberfläche fortwandern, beeinflussen vorwiegend das Wetter an den Orten auch ihrer weiteren Umgebung.

Ein klares Bild der Verteilung des Luftdruckes an der Erdoberfläche für einen bestimmten Zeitpunkt erhält man, wenn man auf einer Karte die Orte, welche gleichen Luftdruck haben, durch Linien (Isobaren) verbindet.

Die Temperatur eines Ortes ist infolge der Rotation der Erde einer täglichen und infolge der Revolution derselben einer jährlichen periodischen Schwankung unterworfen; sie hängt aber auch von der Bodenbeschaffenheit des Ortes, ferner von seiner Höhe über dem Meeresspiegel und überdies von der Temperatur der vorherrschenden Windströmungen ab. Das Maximum der täglichen Temperatur stellt sich im allgemeinen einige Stunden nach Mittag, das Minimum kurz vor Sonnenaufgang ein. Das Maximum der Jahrestemperatur fällt in den Juli, das Minimum in den Januar.

Um die gleichzeitigen Temperaturverhältnisse auf der Erd-

oberfläche anschaulich zu machen, zeichnet man in eine Karte Linien ein, auf welcher die Orte mit gleicher Temperatur liegen. (Isothermen.)

Die Atmosphäre enthält stets eine grössere oder geringere Menge Wasserdampf; Änderungen des Wasserdampfgehaltes in der Luft werden mittelst des Hygrometers festgestellt; dieses besteht in seiner einfachsten Form aus einem Haare, das an dem einen Ende befestigt ist und durch ein am anderen Ende angebrachtes Gewichtchen gespannt gehalten wird; mit zunehmender Feuchtigkeit dehnt sich das Haar etwas aus, mit Abnahme derselben wird es kürzer; um diese Längenänderungen sichtbar zu machen, ist das Haar an einen beweglichen Zeiger geknüpft.

71. Wolkenbildung. Regen, Schnee, Tau.

Bei einer bestimmten Temperatur kann die Luft Wasserdampf bis zu einem bestimmten Maximum enthalten (63); steigt die Temperatur, so kann also die Luft eine grössere Menge von Wasserdampf aufnehmen; ist dagegen die Luft mit Wasserdampf gesättigt und die Temperatur fällt, so kondensiert sich der Wasserdampf zu feinen Bläschen, es entsteht Nebel, den wir Wolken nennen, wenn er sich in höheren Luftschichten befindet.

Nach ihrer Form unterscheidet man Haufenwolken (cumulus), Schichtenwolken (stratus) und Federwolken (cirrus); die letzteren bestehen wahrscheinlich aus Eisnadeln.

Mit fortschreitender Kondensation entsteht die Regenwolke (nimbus), aus welcher das Wasser wegen seines grösseren spezifischen Gewichtes als Regen, bei Temperaturen unter 0° als Schnee fällt. Dieser hat meist die Form von regelmässig-sechseitigen Krystallen; zusammengeballte Schneeflocken nennt man Graupeln. Mit Gewittererscheinungen ist oft der Fall von Hagelkörnern verbunden; diese bestehen aus einem Eiskerne, welcher von konzentrischen Eisschichten umschlossen ist — Kühlt sich die Oberfläche der Erde durch Strahlung während der Nacht unter die Temperatur der Luft ab, so schlägt sich der Wasserdampf der letzteren als Tau und falls die Temperatur des Erdbodens unter 0° sinkt als Reif auf diesem nieder.

72. Das Wetter unter einem barometr. Maximum und Minimum. Wettervorhersage.

Ein Ort, über welchem ein barometrisches Maximum liegt, hat meist klares, im Sommer warmes, im Winter kaltes Wetter; unter einem Minimum ist es gewöhnlich trüb und regnerisch.

Da nämlich die Luft unterhalb des Maximums an der Erdoberfläche seitlich abströmt, so muss über dem Orte eine Luftströmung von oben nach unten entstehen; je tiefer die Luft aber herabsinkt, in desto wärmere Schichten gelangt sie, desto mehr Wasserdampf kann sie aufnehmen, ohne dass dieser sich kondensiert; der Himmel ist also über dem Maximum klar, die Wärmestrahlung von der Sonne zur Erde am Tage und von der Erde in den Raum bei Nacht unbehindert. Über einem Minimum liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt; die Luftströmung hat eine aufsteigende Richtung, sie gelangt aus wärmeren in kältere Schichten; der Wasserdampf muss sich also kondensieren, es entstehen Wolken, welche die Wärmestrahlung zur und von der Erde verhindern; deshalb ist es unter einem Minimum im Sommer kühl, im Winter weniger kalt.

Um für eine Gegend das am kommenden Tage zu erwartende Wetter mit einiger Sicherheit vorausbestimmen zu können, lässt man die Beobachtungen, welche täglich zu festgesetzter Zeit an vielen Orten der Erde über Druck, Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt der Luft, Windrichtung, Niederschläge u. s. w. gemacht werden, einer in dieser Gegend befindlichen Sammelstelle (Zentralstation) mitteilen; dort werden sie in Karten eingetragen; aus dem Verlaufe der Isobaren, Isothermen u. s. w. gewinnt man ein Bild für den Witterungszustand des betreffenden Tages und kann die voraussichtlichen Änderungen für den kommenden Tag mit grosser Wahrscheinlichkeit vorhersagen.

Fünfter Abschnitt.

Von der Bewegung der Körper. (Dynamik.)

A. Bewegung infolge der Wirkung einer Kraft oder zweier gleich gerichteten Kräfte.

73. Gleichförmige Bewegung.

Ein Körper muss seine Lage im Raume ändern, sobald die Kräfte, welche auf ihn wirken, nicht im Gleichgewichte sind (17); je nach Beschaffenheit der Kräfte ergeben sich verschiedene Arten der Bewegung.

Wirkt auf einen Körper eine Kraft nur einen Augenblick lang oder wird eine dauernd wirkende Kraft dazu verwandt, die Bewegungshindernisse (Reibung, Luftwiderstand) eines einmal in Bewegung gesetzten Körpers fortzuräumen, so legt der Körper in gleichen Zeitabschnitten gleiche Wegstrecken zurück. Eine derartige Bewegung heisst gleichförmig und der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg die Geschwindigkeit des Körpers; beträgt diese v (m), so ist der Weg, welchen der Körper nach t Zeiteinheiten zurückgelegt hat,

$$s = v \cdot t \text{ (m).}$$

Die Geschwindigkeit muss unter sonst gleichen Umständen um so grösser sein, je grösser die wirkende Kraft und je kleiner die Masse des bewegten Körpers ist.

Zusatz. Ist die Grösse der Bewegungshindernisse veränderlich, so ändert sich auch die Geschwindigkeit des Körpers; man spricht dann von einer mittleren Geschwindigkeit desselben; so macht beispielsweise durchschnittlich in der Sekunde ein Fussgänger 1,5—1,7 m, ein Pferd im Laufe 1,8—2,2 m, ein Dampfschiff 7—10 m, ein Personenzug 12 m, ein Eilzug 20 m, eine Brieftaube 40 m, eine Gewehrkuugel 475 m, eine Kanonenkuugel 725 m, der Mond auf seiner Bahn um die Erde 1050 m, die Erde bei ihrem Laufe um die Sonne 30 570 m.

74. Gleichförmig beschleunigte Bewegung.

Wirkt auf einen Körper dauernd eine Einzelkraft von unveränderlicher Grösse, so muss die Geschwindigkeit des Körpers, da er durch die Kraft in jedem Zeiteilchen einen neuen Antrieb von gleicher Grösse erfährt, von einem Zeiteilchen bis zum nächsten je um dieselbe Grösse zunehmen; diese unveränderliche Geschwindigkeitszunahme heisst Beschleunigung, die Bewegung des Körpers gleichförmig-beschleunigt. Geschwindigkeit des Körpers in irgend einem Augenblicke ist hier der Weg, welchen der Körper in der nächstfolgenden Zeiteinheit zurücklegen würde, wenn die Kraft zu wirken aufhörte.

Die Schwerkraft der Erde ist für einen Ort der Erdoberfläche von unveränderlicher Grösse; sie versetzt also die Körper in eine gleichförmig-beschleunigte Bewegung; beim freien Falle derselben nimmt aber die Geschwindigkeit so rasch zu, dass eine unmittelbare Messung derselben nicht gut möglich ist; um daher die Gesetze der gleichförmig-beschleunigten Bewegung feststellen zu können, bedient man sich einer Vorrichtung, der sogenannten (Atwoodschen) Fallmaschine.

Auf einer etwa 2 m hohen, lotrecht stehenden, festen Stange AB (Fig. 59) befindet sich ein leicht drehbares Rad R mit ausgehöhltem Rande; um dieses ist eine feine Schnur gelegt, die durch zwei an ihren Enden befestigte, gleich schwere Körperchen MM gespannt längs der Stange beiderseits herabhängt. Wird nun auf eines dieser Körperchen ein kleines Übergewicht P aufgelegt, so hat dieses das Bestreben, sich gegen den Erdmittelpunkt hin zu bewegen; da aber der an dem Übergewichtchen wirkende Zug der Schwere nicht bloss dieses, sondern auch die beiden Körperchen an der Schnur und das Rad in Bewegung setzen muss, so ist seine Geschwindigkeit in jedem Augenblicke kleiner als wenn es frei herabfiel.

Mittels des verschiebbaren Tellers EF kann die Bewegung in jedem Augenblicke gehemmt werden; der ebenfalls verschiebbare Teller CD besitzt eine Öffnung, welche zwar das Körperchen M hindurch lässt, das Übergewicht P aber von M abhebt; die Zeit wird durch ein Sekundenpendel (83.) gemessen, das in dem Augen-

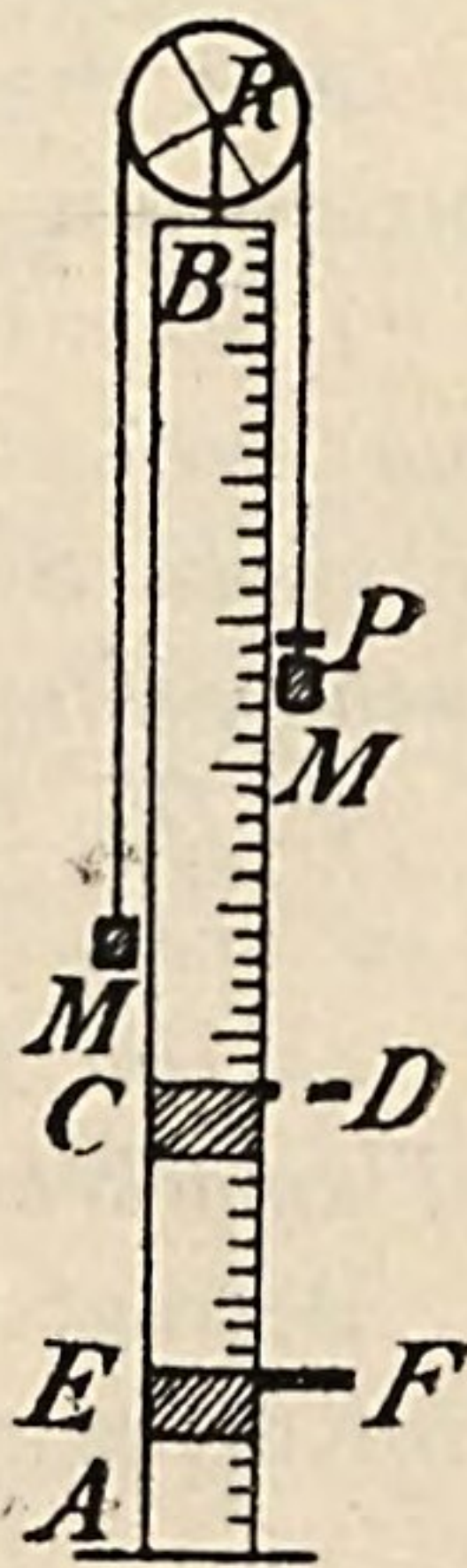


Fig. 59.

blicke seine Schwingungen beginnt, in welchem das Übergewichtchen zu fallen anfängt; die von diesem zurückgelegten Wege werden an einem Massstabe abgelesen, der an der Stange angebracht ist.

Versuche. 1. Man beobachtet die Strecken, welche das Übergewichtchen nach einer, nach zwei, nach drei Sekunden u. s. w. zurückgelegt hat; man findet, dass diese Strecken sich wie 1:4:9:16 verhalten.

2. Nimmt man das Übergewichtchen nach einer Sekunde ab, so bewegen sich von da ab die Körperchen an der Schnur gleichförmig weiter, mit einer Geschwindigkeit, welche doppelt so gross ist als der Weg, den das Übergewichtchen in der ersten Sekunde machte; wenn das Übergewichtchen nach zwei, nach drei Sekunden weggenommen wird, so ist die Geschwindigkeit der sich ergebenden gleichförmigen Bewegung zweimal, dreimal grösser als im ersten Falle. Ferner ergibt sich, dass die Beschleunigung ebenso gross ist wie die Geschwindigkeit am Ende der ersten Sekunde.

3. Nimmt man ein schwereres Übergewichtchen, so wächst unter sonst gleichen Umständen die Beschleunigung proportional dem Gewichte desselben; ändert man dagegen die Körperchen an der Schnur, so nimmt die Beschleunigung in demselben Verhältnisse ab, in welchem ihr Gewicht, als auch ihre Masse zunimmt.

Aus diesen Beobachtungen schliesst man, dass für jede gleichförmig-beschleunigte Bewegung folgende Gesetze gelten:

1. *Der Weg, welchen ein Körper bei gleichförmiger Beschleunigung zurücklegt, ist dem Quadrate der Zeit proportional; die in der ersten Sekunde durchlaufene Strecke ist halb so gross wie die Beschleunigung.*

2. *Die Geschwindigkeit (in einem bestimmten Augenblicke) ist so gross wie das Produkt aus der Zeit und der Beschleunigung.*

3. *Die Beschleunigung ist proportional der bewegendem Kraft und umgekehrt proportional der bewegten Masse.*

Beträgt also die Beschleunigung γ (m), so ist der Weg, den der Körper in t Sekunden zurücklegt

$$s = \frac{1}{2} \gamma t^2 \text{ (m);}$$

und die Geschwindigkeit, die er nach t Sekunden erlangt

$$v = \gamma t \text{ (m).}$$

Bezeichnet ferner p die bewegendem Kraft, m die bewegte Masse, so ist $\gamma = f \cdot (p:m)$, wobei f einen Zahlenfaktor bezeichnet;

bei passender Wahl der Masseinheiten wird aber $f = 1$ (siehe 76); dann ist

$$\gamma = p : m.$$

Zusatz. Diese Gesetze lassen sich auch theoretisch begründen; die Gleichung $v = \gamma t$ ergibt sich aus dem Begriffe der gleichförmigen Beschleunigung; der Weg, welchen ein Körper bei gleichförmig-beschleunigter Bewegung in einer bestimmten Zeit t und bei einer bestimmten Endgeschwindigkeit v zurücklegt, kann aber kein anderer sein als der, welchen er machte, wenn er sich gleichlange, gleichförmig mit der mittleren Geschwindigkeit $\frac{1}{2}(0 + v)$ bewegte; also $s = \frac{1}{2}vt$ oder $s = \frac{1}{2}\gamma t^2$.

75. Freier Fall. Der lotrechte Wurf.

Mit Hilfe der Grössen, welche an der Fallmaschine in Betracht kommen, lässt sich nun auch die Grösse der Beschleunigung eines frei fallenden Körpers bestimmen. Die bewegendende Kraft ist bei beiden Bewegungen dieselbe, nämlich der an dem Übergewichtchen wirksame Zug p der Schwerkraft; die bewegte Masse ist aber beim freien Falle lediglich die Masse m des Übergewichtchens, während sie an der Fallmaschine aus dieser, der Masse $2q$ der Körperchen an der Schnur und der Masse r des Rades besteht. Ist also g die Beschleunigung eines frei fallenden Körpers, γ die desselben Körpers an der Fallmaschine, so ist (nach 74)

$$g = p : m; \quad \gamma = p : (m + 2q + r); \quad \text{also } g = \frac{m + 2q + r}{m} \cdot \gamma.$$

m , q , r und γ lassen sich experimentell bestimmen und dann g berechnen.

Die Beschleunigung g des freien Falles ist, wie zahlreiche Untersuchungen nachgewiesen haben, im luftleeren Raume für alle Körper am gleichen Orte der Erdoberfläche gleich gross, hat aber an verschiedenen Orten etwas andere Werte; im Mittel ist $g = 9,81$ (m).

Für einen frei fallenden Körper gelten daher die Gleichungen

$$s = \frac{1}{2} g t^2 \text{ (m) und } v = g t \text{ (m).}$$

Zusatz. Da $t = \sqrt{2s : g}$ ist, so ergibt sich für v auch der Wert $v = \sqrt{2gs}$.

Wird ein Körper lotrecht abwärts geworfen durch eine Kraft, die ihm die gleichförmige Geschwindigkeit a (m) erteilt, so ergeben sich, da jede Kraft zur Geltung kommt, für den Weg s , den er unter dem Einflusse der Schwere in t Sekunden

zurücklegt und die gleichzeitig erlangte Geschwindigkeit v die Gleichungen

$$s = at + \frac{1}{2}gt^2 \text{ (m); und } v = a + gt \text{ (m);}$$

und dementsprechend für den Wurf in der Richtung lotrecht aufwärts

$$s = at - \frac{1}{2}gt^2 \text{ (m) und } v = a - gt \text{ (m).}$$

Im letzteren Falle hört ein Körper zu steigen auf, wenn $v = 0$ ist, also nach $t = a:g$ Sekunden und erreicht dabei die Höhe $s = \frac{1}{2}a^2:g$ (m).

76. Masseinheiten der Kraft und der Masse.

Die Beschleunigung γ , welche ein Körper von der Masse m durch eine Kraft p in der Zeiteinheit erfährt, ist (nach 74) durch die Gleichung $\gamma = f \cdot (p:m)$ bestimmt. Der Faktor f wird nun gleich 1, wenn man entweder eine beliebige Masse als Masseneinheit wählt und dann als Krafteinheit diejenige Kraft, welche dieser Masse eine Beschleunigung gleich der Längeneinheit erteilt oder auch wenn die Krafteinheit willkürlich angenommen wird, als Masseneinheit aber diejenige Masse, welche durch diese Krafteinheit eine Beschleunigung gleich der Längeneinheit erfährt.

In der Physik gilt als Zeiteinheit die Sekunde, als Längeneinheit das cm, als Masseneinheit die Masse eines Gramms; die zugehörige Krafteinheit heisst Dyne; letztere ist, da die Schwerkraft der Grammasse eine Beschleunigung von 981 cm erteilt, dem Drucke gleich, welchen eine Masse von $1/981$ Gramm auf eine Unterlage ausübt. (Absolutes Masssystem.)

In der Technik nimmt man als Zeiteinheit ebenfalls die Sekunde, als Längeneinheit aber das m und als Krafteinheit den Druck, welchen die Masse eines kg ausübt. Masseneinheit muss dann, da die Schwerkraft der Masse eines kg eine Beschleunigung von 9,81 m erteilt, dem Begriffe gemäss die Masse von 9,81 kg sein. (Terrestrisches System.)

Bemerkung. Da eine Dyne einer Masse von $1/100$ g Gramm die Beschleunigung $100g$ (cm) erteilt, so bleibt die Dyne dem Werte nach ungeändert, wenn auch g sich ändert; die Masseinheiten des absoluten Masssystems sind also für alle Orte der Erdoberfläche dieselben; dagegen sind die Masseinheiten der Kraft und der Masse beim terrestrischen System je nach dem Werte von g veränderlich.

77. Arbeit einer Kraft. Lebendige Kraft. Spannkraft.

Eine Kraft leistet eine Arbeit, wenn sie eine Masse in Bewegung setzt; die Grösse der Arbeit ist gemessen durch das Produkt aus der Kraftgrösse in die Strecke, längs deren sie gewirkt hat. Einheit der Arbeit ist im absoluten Masssysteme das Erg, diejenige Arbeit, welche eine Dyne auf einer Strecke von 1 cm leistet, im terrestrischen System aber das Kilogramm-meter, jene Arbeit, welche die Schwere der Kilogramm-masse auf einem Wege von 1 m zu stande bringt.

$$1 \text{ kgm} = 10^7 \cdot 9,81 \text{ Erg}; 1 \text{ Pferdekraft} = 75 \text{ kgm}.$$

Wirkt nun eine Kraft p längs einer Strecke s an einer Masse m , so erteilt sie letzterer eine Geschwindigkeit v ; dadurch kann aber diese Masse selbst wieder andere Massen bewegen, also Arbeit leisten; nach dem Vorhergehenden ist aber $p \cdot s = m \cdot g \cdot \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} m v^2$; dieses Produkt $\frac{1}{2} m v^2$ ist also ein Mass für die Arbeit, welche eine sich mit der Geschwindigkeit v bewegendende Masse m leisten kann und heisst ihre lebendige Kraft oder kinetische Energie.

Ist ein Körper, auf welchen eine Kraft gewirkt hat, durch einen Widerstand gehindert, sich zu bewegen, so besitzt er keine lebendige Kraft; aber er hat die Fähigkeit, Arbeit zu leisten, sobald das Hindernis entfernt wird; diese Arbeitsfähigkeit heisst Spannkraft oder potentielle Energie des Körpers.

Beispielsweise besitzt jeder auf einer Unterlage befindliche Körper potentielle Energie; wird die Unterlage entfernt, so fällt er gegen den Mittelpunkt der Erde und erlangt dadurch umso mehr kinetische Energie, je tiefer er fällt; stösst er dabei auf ein Hindernis, so kann sich letztere teilweise auch in Wärme (68), also in kinetische Energie molekularer Bewegungen (69) umsetzen. Derartige Verwandlungen von Energieformen kommen in der Natur sowohl als auch in der Technik fortwährend vor. Dagegen kann Energie im Universum weder neu entstehen, noch vergehen. Die Energie des Weltalls ist eine unveränderliche Grösse. (Satz von der Erhaltung der Energie.)

78. Bewegung auf einer schiefen Ebene.

Die Bewegung eines Körpers auf einer schiefen Ebene muss gleichförmig beschleunigt sein; denn die Kraft, welche an ihm wirkt, ist die in die Richtung der schiefen Ebene fallende Komponente seines Gewichtes und diese ist eine Kraft von unveränderlicher Grösse. Ist nun p das Gewicht eines Körpers, h die

Höhe, l die Länge der schiefen Ebene, so ist jene Komponente (nach 31a) gleich $p \cdot (h:l)$ oder wenn man den Neigungswinkel mit α bezeichnet, $p \cdot \sin \alpha$. Ist aber m die Masse des Körpers, g die Beschleunigung beim freien Falle, so ist $p = mg$ (74) und folglich die Beschleunigung auf der schiefen Ebene (nach 74) $\gamma = p \cdot \sin \alpha : m = g \cdot \sin \alpha$.

In t Sekunden durchläuft also ein Körper auf einer schiefen Ebene von der Neigung α den Weg

$$s = \frac{1}{2} g \sin \alpha \cdot t^2;$$

und erreicht dabei die Geschwindigkeit

$$v = g \sin \alpha \cdot t.$$

Wird ein Körper durch eine momentane Kraft längs einer schiefen Ebene mit der Geschwindigkeit a (m) abwärts, bezw. aufwärts gestossen, so ergeben sich demgemäss für den nach t Sekunden zurückgelegten Weg s und die dabei erlangte Geschwindigkeit v die Gleichungen

$$s = at \pm \frac{1}{2} g \sin \alpha \cdot t^2; \quad v = a \pm g \sin \alpha \cdot t.$$

Zusatz. Für die Zeit eines über eine schiefe Ebene frei herabrollenden Körpers ergibt sich aus der obigen Gleichung für s der Wert $t = \sqrt{2s : (g \sin \alpha)}$; daraus folgt, dass $v = \sqrt{2gs \sin \alpha} = \sqrt{2gh}$; dieselbe Geschwindigkeit erreicht aber (nach 75. Zus.) ein über die Höhe h frei fallender Körper. Ein über eine schiefe Ebene herabrollender Körper kommt also an ihrem Fusse mit derselben Geschwindigkeit an, welche ein längs ihrer Höhe frei herabfallender Körper am Fusse der letzteren hat.

B. Bewegung infolge der Wirkung zweier Kräfte von ungleicher Richtung.

79. Zusammengesetzte geradlinige Bewegung.

Wirken auf einen Körper im gleichen Augenblicke zwei momentane Kräfte von ungleicher Richtung, so muss er sich gerade so bewegen, als ob auf ihn nur eine Kraft, nämlich die Resultante dieser beiden Kräfte gewirkt hätte (19); seine Bewegung muss also eine gleichförmige sein. Die Geschwindigkeit einer solchen Bewegung ist aber der Grösse der wirksamen Kraft proportional und fällt in die Richtung der letzteren und der nach einer bestimmten Zeit zurückgelegte Weg wächst in demselben Verhältnisse wie diese Zeit (73).

Deshalb muss sich ein Körper, auf welchen gleichzeitig zwei momentane Kräfte wirken, mit einer Geschwindigkeit bewegen, welche der Grösse und Richtung nach dargestellt ist durch die Diagonale desjenigen Parallelogramms, dessen Seiten der Grösse und Richtung nach die Geschwindigkeiten sind, welche die einzelnen Kräfte erzeugt hätten (Parallelogramm der Geschwindigkeiten); in irgend einer Zeit durchläuft der Körper die Diagonale desjenigen Parallelogramms, dessen Seiten der Grösse und Richtung nach die Strecken sind, welche er unter der Wirkung der einzelnen Kräfte durchlaufen hätte. (Parallelogramm der Wege.)

Wirken auf einen Körper dauernd vom gleichen Augenblicke an zwei unveränderliche Kräfte, so muss, da diese sich durch eine unveränderliche Kraft ersetzen lassen (19), die Bewegung des Körpers gleichförmig-beschleunigt sein; die Beschleunigung ist aber dieser einen bewegenden Kraft proportional (74) und fällt in die Richtung derselben.

Die Beschleunigung, mit welcher sich ein Körper unter dem Einflusse zweier konstanten Kräfte bewegt, ist daher durch die Diagonale desjenigen Parallelogramms dargestellt, dessen Seiten der Grösse und Richtung nach die Beschleunigungen der einzelnen Kräfte darstellen. (Parallelogramm der Beschleunigungen.)

Die Geschwindigkeit der resultierenden Bewegung nach irgend einer Zeit und der gleichzeitig durchlaufene Weg ist aber, da die durch die einzelnen Kräfte erzeugten Geschwindigkeiten der Zeit, die Wege ihrem Quadrate proportional sind, wie im obigen Falle durch die Diagonale des Geschwindigkeits- bzw. Wegeparallelogramms bestimmt.

Umgekehrt lässt sich mit Hilfe der genannten Parallelogramme eine geradlinige, gleichförmige oder gleichförmig-beschleunigte Bewegung durch zwei gleichartige, gleichzeitige Bewegung ersetzen.

Bemerkung. Alle hieher gehörigen Aufgaben können konstruktiv oder rechnerisch mit Hilfe von Dreiecken gelöst werden.

80. Der schiefe Wurf.

Wird ein Körper auf der Erdoberfläche durch eine momentane Kraft in einer Richtung gestossen, die mit dem Horizonte einen Winkel α , den sogen. Elevationswinkel, bildet, so befindet er sich, da er gleichzeitig durch die Schwere mit gleichförmiger Beschleunigung lotrecht abwärts gezogen wird, zwar wieder am

Ende eines jeden Zeitabschnittes im vierten Eck eines Parallelogrammes, dessen Seiten der Grösse und Richtung nach die Strecken sind, die er gleichzeitig von seinem Ausgangspunkte aus in der Richtung einer jeden der beiden Kräfte für sich genommen zurückgelegt hätte; *aber seine Bewegung kann nicht mehr in einer geraden Linie vor sich gehen*, weil die eine dieser Strecken im Verhältnisse der Zeit, die andere in dem ihres Quadrates wächst. Die krumme Linie, welche er bei seiner Bewegung durchläuft, heisst Parabel.

Der Ort, an welchem sich der geworfene Körper t Sekunden nach dem Beginne seiner Bewegung befindet, lässt sich nun konstruktiv und rechnerisch bestimmen: Infolge des Stosses

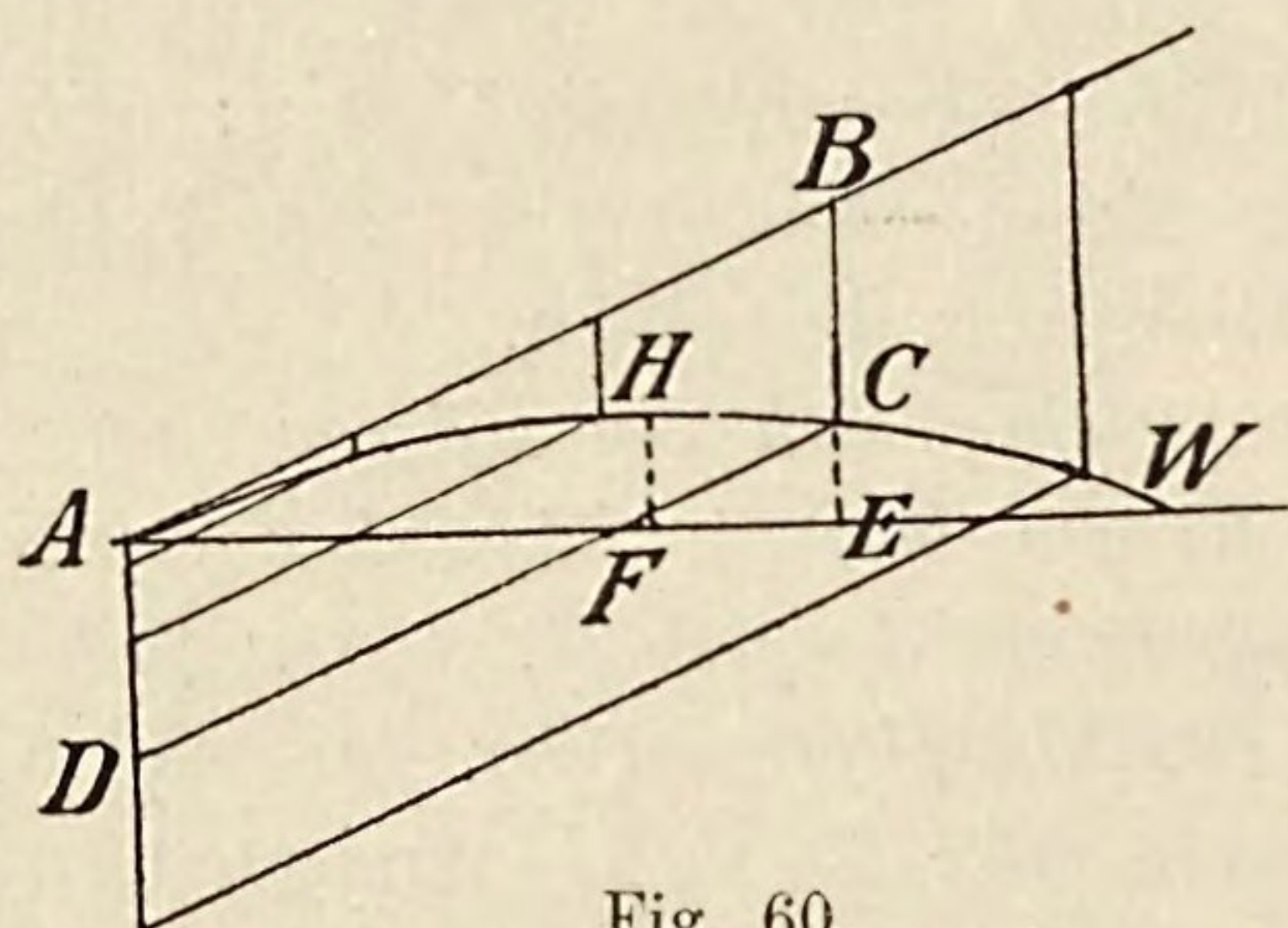


Fig. 60.

hätte er in dieser Zeit den Weg $AB = at$ (Fig. 60) zurückgelegt, wenn dieser Stoss ihm eine Geschwindigkeit a (m) erteilt; gleichzeitig wäre er unter dem alleinigen Einflusse der Schwere um die Strecke $AD = \frac{1}{2} g t^2$ lotrecht abwärts ge-

fallen; thatsächlich befindet er sich also im Punkte C. Nun ist im $\triangle ABE$: $AE = at \cos \alpha$; $BE = at \sin \alpha$; ferner ist $BC = AD = \frac{1}{2} g t^2$; also $CE = BE - BC = at \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2$; setzt man daher $AE = x$ und $CE = y$, so ist die Lage des Punktes C bestimmt durch die Gleichungen

$$x = at \cos \alpha \quad (1)$$

$$y = at \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2. \quad (2)$$

Zusatz. Die Geschwindigkeit beim schiefen Wurf ist nach Grösse und Richtung veränderlich; um den Wert zu finden,

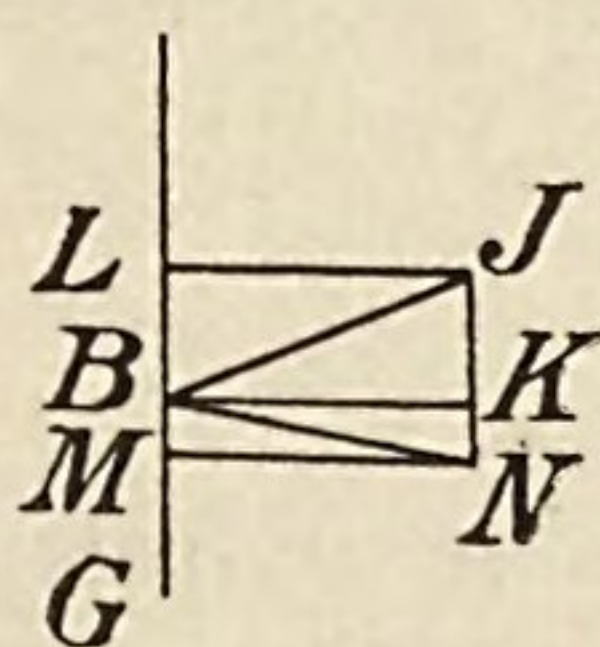


Fig. 60 a.

welchen sie nach t Sekunden hat, ersetzen wir die Geschwindigkeit BJ (Fig. 60 a) des Stosses durch eine horizontale Komponente $BK = a \cos \alpha$ und durch eine vertikale $BL = a \sin \alpha$; da nun die Schwerkraft nur in vertikaler Richtung wirkt, so beträgt die horizontale Geschwindigkeitskomponente der Wurfbewegung während ihrer ganzen Dauer $BK = v_x = a \cos \alpha$. Die vertikale Geschwindigkeit hat aber nach t Sekunden, da die Schwerkraft die Ge-

schwindigkeit $BG = gt$ lotrecht abwärts erzeugt, den Wert $BM = BL - BG = v_y = a \sin \alpha - gt$. Die resultierende Geschwindigkeit ist also in diesem Augenblicke $BN = v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{a^2 - 2agt \sin \alpha + g^2 t^2} = \sqrt{a^2 - 2gy}$.

Der Körper erreicht seine Wurfhöhe d. h. den grössten vertikalen Abstand FH (Fig 60) vom Horizonte seines Ausgangspunktes, wenn $v_y = 0$ ist, also nach $t_1 = (a \sin \alpha) : g$ Sek. Setzt man diesen Wert in die obige Gleichung (2) ein, so ergibt sich für die Wurfhöhe der Wert $FH = y' = (a^2 \sin^2 \alpha) : 2g$.

Der Körper kommt wieder in den Horizont seines Ausgangspunktes in W (Fig. 60) zurück, wenn $y = 0$ wird, also nach $t_2 = (2a \sin \alpha) : g$ Sek. Setzt man diesen Wert in die obige Gleichung (1) ein, so ergibt sich für diesen Augenblick die Entfernung von seinem Ausgangspunkte, die Wurfweite, $AW = x' = (a^2 \sin 2\alpha) : g$.

Bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit ergibt sich daher für eine Elevation von $(45 + \beta)^\circ$ dieselbe Wurfweite wie für $(45 - \beta)^\circ$.

Da $t_2 = 2 \cdot t_1$ ist, so folgt, dass ein schief geworfener Körper ebenso lange braucht, um seine Wurfhöhe zu erreichen, als um von dieser in den Horizont seines Ausgangspunktes zurückzukehren.

Bemerkung. Die obigen Entwicklungen setzen voraus, dass die Wurfbewegung im luftleeren Raume vor sich geht; ist dies nicht der Fall, so weicht die Bahn wegen des Luftwiderstandes, namentlich im absteigenden Zweige, von der Parabel ab; Wurfhöhe und Wurfweite werden kleiner.

81. Zentralbewegung.

a) Zentralbewegung im allgemeinen.

Zentralbewegung heisst jede Bewegung, bei welcher ein Körper, der sich infolge eines momentanen Stosses längs einer Geraden zu bewegen strebt, fortwährend durch eine Kraft in der Richtung gegen einen festen, nicht auf dieser Geraden liegenden Punkt getrieben wird; dieser Punkt heisst das Zentrum der Bewegung und die Kraft, welche den Körper dahin treibt Zentripetalkraft.

Die Zentripetalkraft bewirkt fortwährend eine Änderung der Bewegungsrichtung; deshalb ist die Bahn des Körpers eine krumme Linie, deren Gestalt jedoch von der Beschaffenheit der Zentripetalkraft abhängt. Dem Trägheitsprinzip gemäss sucht sich aber der Körper in jedem Augenblicke von dieser Bahn und zwar in der Richtung der jeweiligen Tangente fortzubewegen;

er hat also das Bestreben, sich vom Zentrum zu entfernen und übt infolgedessen auf einen anderen Körper, der ihm in diesem Bestreben Widerstand leistet, einen Zug oder Druck aus, welchen man Zentrifugalkraft nennt.

Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft sind in jedem Augenblicke von gleicher Grösse, aber von entgegengesetzter Richtung.

Von dem Vorhandensein der Zentrifugalkraft bei einer Zentralbewegung überzeugt man sich, wenn man einen Körper, der an dem einen Ende eines Fadens befestigt ist, um die Hand, die das andere Ende desselben hält, rotieren lässt; die Hand fühlt einen nach auswärts gerichteten Zug.

Die gerade Verbindungslinie eines Punktes der Bahn mit dem Zentrum der Bewegung heisst Leitstrahl.

Bei jeder Zentralbewegung durchläuft der Leitstrahl in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

Ist nämlich AB (Fig. 61) der Weg, welchen der Körper infolge des Stosses im ersten Zeiteilchen zurücklegen müsste,

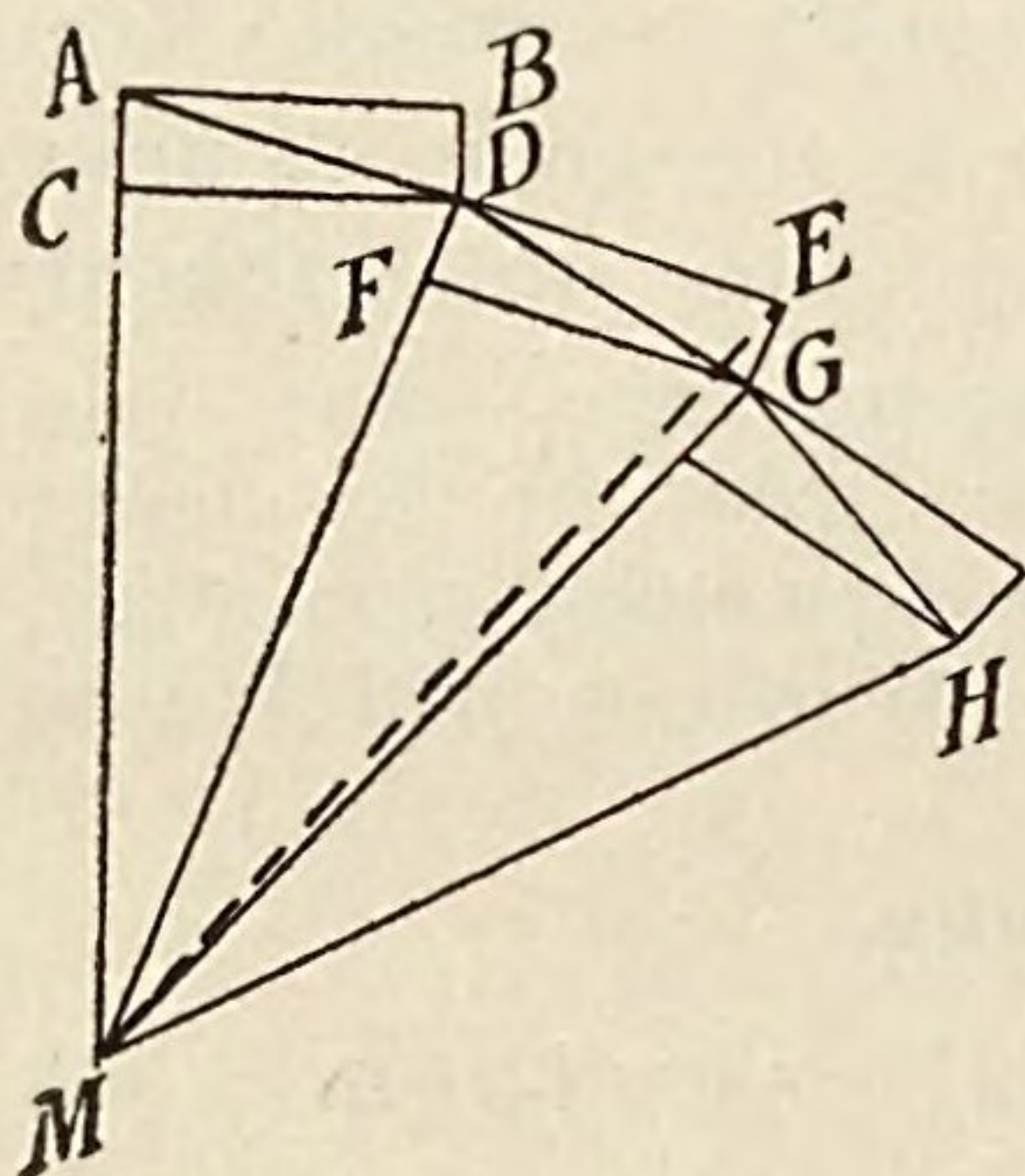


Fig. 61.

AC die Strecke, um welche er gleichzeitig gegen das Zentrum M der Bewegung gezogen würde, so durchläuft er in diesem Zeiteilchen die Diagonale AD des Parallelogramms $ABDC$ und würde sich, falls die Zentripetalkraft nicht weiter wirkte, im nächsten gleich grossen Zeiteilchen in der Richtung AD um die Strecke $DE = AD$ weiter bewegen; da ihn aber diese wieder um die Strecke DF gegen das Zentrum zieht, so durchläuft er

im zweiten Zeiteilchen die Diagonale DG des Parallelogramms $DEGF$ u. s. w. Nun haben die Dreiecke MDA und MDE die Grundlinien AD , DE gleich und die zugehörigen Höhen gemeinsam, die Dreiecke MDE und MDG aber die Seite MD gemeinsam und die zugehörige Höhe gleich; also ist $\triangle MDA = \triangle MDG (= \triangle MDE)$. Ebenso lässt sich beweisen, dass das dem dritten Zeiteilchen entsprechende Dreieck $MGH = \triangle MDG$ ist u. s. w. Der Leitstrahl durchläuft also in gleichvielen, gleichen Zeiteilchen gleichviele, gleiche Dreieckchen, d. h. in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume.

b) Kreisförmige Zentralbewegung.

Im einfachsten Falle durchläuft ein in einer Zentralbewegung befindlicher Körper einen Kreis. *Die kreisförmige Zentralbewegung ist gleichförmig*; denn da die Kreissektoren, welche der Leitstrahl in gleichen Zeiten durchläuft, gleich sind (81 a), so müssen auch die zugehörigen Bogen, welche der Körper zurücklegt, von gleicher Grösse sein.

Versuche bezüglich der kreisförmigen Zentralbewegung werden mit der Schwungmaschine angestellt; diese besteht aus zwei ungleichen, durch eine straff gespannte Schnur verbundenen Rädern; wird das grössere Rad gedreht, so rotiert das kleinere in demselben Verhältnisse rascher als das grössere, in welchem sein Radius kleiner ist wie der des grösseren Rades.

Ein elastischer, kreisförmiger Metallbogen plattet sich bei der Rotation um einen Durchmesser ab und zwar um so mehr, je rascher diese vor sich geht.

Eine Flüssigkeit legt sich in einem kugelförmigen, um einen Durchmesser rotierenden Gefässe bandförmig um den auf der Rotationsachse senkrecht stehenden grössten Kreis; von zwei ungleichen Flüssigkeiten entfernt sich die dichtere weiter von der Rotationsachse.

Zwei Kugeln von ungleicher Masse, welche durch eine Schnur verbunden auf einer horizontalen Stange leicht verschoben werden können, halten sich bei der Rotation dieser Stange um eine darauf senkrecht stehende Achse Gleichgewicht, wenn ihre Entfernungen von dieser Achse im verkehrten Verhältnisse ihrer Massen stehen. Ist dies nicht der Fall, so verschieben sie sich auf der Stange nach der Seite derjenigen Kugel, für welche das Produkt aus Masse und Entfernung von der Achse das grössere ist.

Die Kugeln des Zentrifugalregulators (64) entfernen sich von der Rotationsachse um so mehr, je grösser die Rotationsgeschwindigkeit wird.

Aus diesen Versuchen lässt sich im allgemeinen erkennen, dass die Zentrifugalkraft, also auch die Zentripetalkraft bei einer kreisförmigen Zentralbewegung grösser wird, wenn der Radius des von einem Körper durchlaufenen Kreises wächst, wenn die Rotationsgeschwindigkeit zunimmt und wenn die Masse des rotierenden Körpers grösser wird.

82. Die Anziehung der Massen.

Eine Zentralbewegung ist auch die Bewegung der Planeten um die Sonne, sowie die der Monde um die Planeten. *Diese Bewegung lässt sich am einfachsten durch die Annahme erklären, dass der Körper, welcher sich im Zentrum der Bewegung befindet, und der Körper, welcher sich um diesen bewegt, sich gegenseitig mit einer Kraft anziehen, die dem Produkte ihrer Massen gerade, dem Quadrate ihrer Entfernung aber verkehrt proportional ist.* (Newtonsches Attraktionsgesetz.)

Diese allgemeine Anziehungskraft der Massen ist auch seitens des Erdkörpers auf die an seiner Oberfläche befindlichen Körper wirksam und heisst hier die Schwerkraft der Erde (2); ist also M die Masse der Erde, m die Masse eines Körpers auf derselben, r seine Entfernung vom Erdmittelpunkte, so ist die Kraft, mit der er gegen diesen hingezogen wird

$$p = f \cdot M \cdot m : r^2,$$

wobei f einen Zahlenfaktor bezeichnet, der für alle Körper den gleichen Wert hat. (Siehe auch 9.)

83. Pendelbewegung.

Jeder Körper, welcher sich um eine oberhalb seines Schwerpunktes befindliche Achse drehen kann, bildet ein Pendel. Unter einem einfachen Pendel versteht man einen mittelst eines als gewichtlos zu betrachtenden, biegsamen Fadens an einem festen Punkte aufgehängten schweren Körper von nicht zu grosser Ausdehnung; die Entfernung dieses Körpers vom Aufhängepunkte heisst die Länge des einfachen Pendels.

In der Gleichgewichtslage hängt ein Pendel lotrecht (25); wird es aus dieser entfernt und dann frei gelassen, so schwingt es in die Gleichgewichtslage zurück, über diese hinaus, wieder zurück u. s. f. Die Bewegung eines Pendels aus seiner grössten Entfernung von der Gleichgewichtslage auf der einen Seite derselben in P_1 (Fig. 63) bis zu der auf der anderen Seite in P_2 heisst eine Schwingung, der Winkel, ($POP_1 = \alpha$) welchen die Fadenrichtung in einer dieser beiden Grenzlagen mit der Lotlinie im

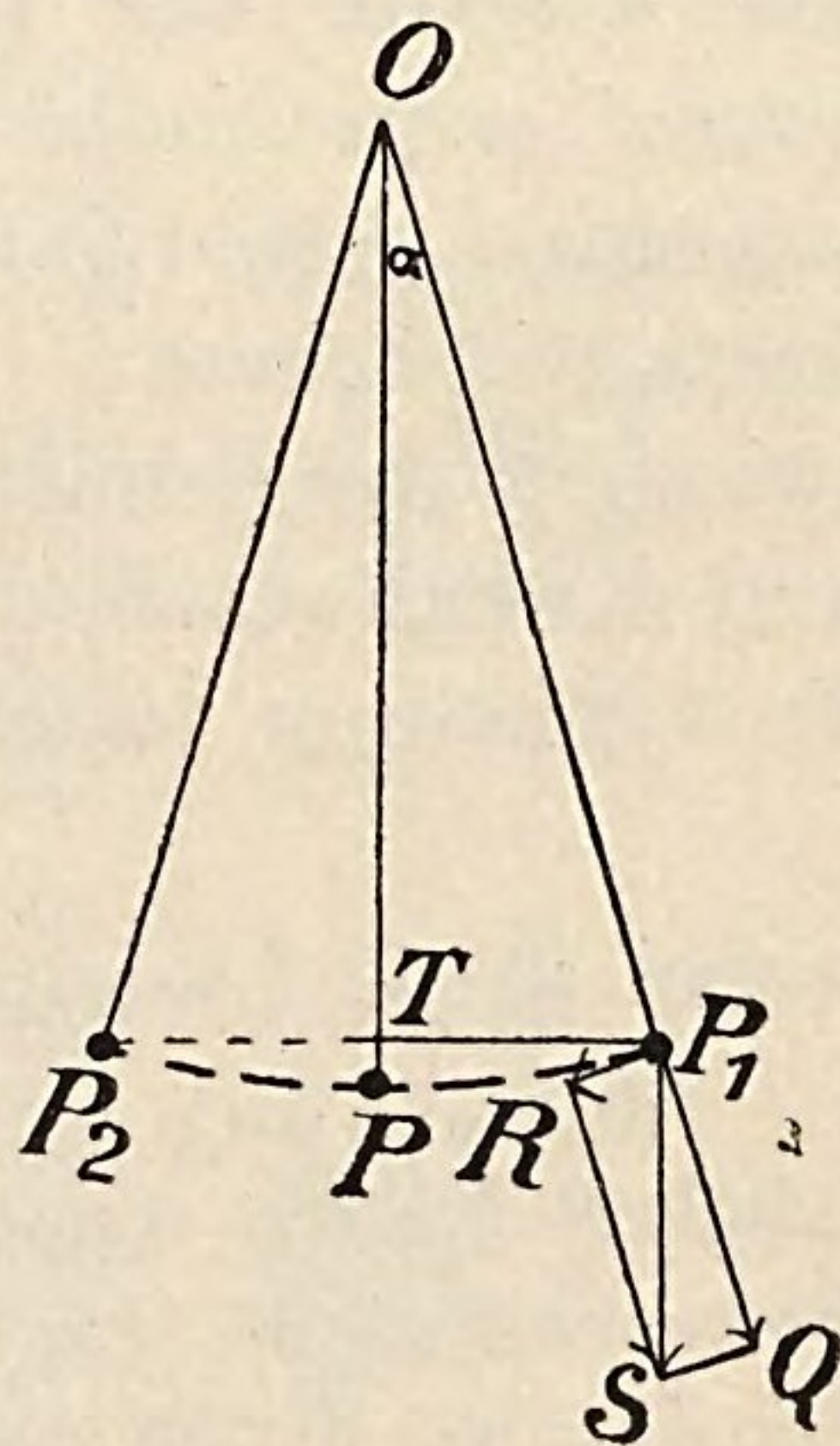


Fig. 63.

Aufhängepunkte bilden, der Ausschlagswinkel, die Zeit t , welche das Pendel zu einer Schwingung braucht die Schwingungsdauer, die Zahl n der Schwingungen, die es in einer Sekunde macht, Schwingungszahl; es ist also immer $n \cdot t = 1$.

Ein Pendel, welches in einer Sekunde eine Schwingung macht heisst Sekundenpendel.

Versuche. Nimmt man bei gleicher Pendellänge als schweren Körper eine kleine Kugel aus Eisen oder Blei oder Stein u. s. w., und zählt die Schwingungen ab, welche diese Körper in einer bestimmten Zahl von Sekunden machen, so ergibt sich, dass die Schwingungsdauer dieselbe ist; sie ändert sich auch nicht, wenn der Ausschlagswinkel sich ändert, aber eine gewisse Grenze, etwa 10° , nicht übersteigt.

Lässt man Pendel schwingen, deren Längen sich wie 1:4:9 verhalten, so findet man, dass ihre Schwingungszeiten im Verhältnisse 1:2:3 stehen.

Die Schwingungsdauer eines Pendels ist an der Meeresoberfläche am kleinsten und wird um so grösser, je weiter man sich von derselben entfernt, je kleiner also die Wirkung der Schwerkraft auf den schwingenden Körper wird (82); genauere Untersuchungen haben gezeigt, dass sie der Quadratwurzel aus der Schwerebeschleunigung umgekehrt proportional ist.

Die Schwingungsdauer eines Pendels ist also von dem Stoffe, aus welchem der schwingende Körper besteht, unabhängig; sie wächst proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge und umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Beschleunigung durch die Schwere. Eingehendere Versuche haben gezeigt, dass zwischen der Schwingungsdauer t eines Pendels, seiner Länge l und der Schwerebeschleunigung g (bei kleinen Ausschlagswinkeln) die Gleichung besteht

$$t = \pi \sqrt{l : g},$$

wobei π die Ludolfische Zahl bezeichnet.

Bemerkung. Die bewegende Kraft bei einer Pendelbewegung ist lediglich die am schwingenden Körper wirksame Schwerkraft der Erde; diese, dargestellt durch die lotrechte Strecke P_1S (Fig. 61), kann man sich in zwei Komponenten zerlegt denken, von denen die eine P_1Q in der Richtung des Fadens wirkend diesen spannt und durch seinen Widerstand aufgehoben wird, während die andere P_1R den Körper in die Gleichgewichtslage zurückzieht. Da nun wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke RP_1S und TP_1O sich $P_1R : P_1S = P_1T : P_1O$ verhält, also die Kraft P_1R sich wegen der Unveränderlichkeit von P_1S und P_1O

proportional $P_1 T$ ändert, so ist die Bewegung eine ungleichförmig-beschleunigte beim Falle, ungleichförmig verzögert beim Aufstiege. Eine elementare streng-mathematische Begründung der obigen Gleichung für t ist daher nicht möglich; näherungsweise kann man sich bei sehr kleinem Ausschlagswinkel die Pendelbewegung durch eine solche auf zwei schiefen Ebenen, nämlich auf den Sehnen $P_1 P$ und PP_2 ersetzt denken; ist aber die Länge derselben je gleich s , so muss, da ihr Neigungswinkel $\frac{1}{2}\alpha$ ist, die Dauer einer Schwingung $t = 2\sqrt{2s : (g \sin \frac{1}{2}\alpha)}$ (78. Zus.) oder weil $\sin \frac{1}{2}\alpha = s : 2l$ ist, $t = 4\sqrt{l : g}$ sein; an die Stelle des Faktors 4 tritt aber bei der wahren Pendelbewegung der Faktor π .

Zusatz 1. Lässt man Pendel von gleicher Länge an zwei Orten von verschiedener Meereshöhe schwingen, so gilt für die Schwingungszeiten derselben nach Obigem die Gleichung $t_1 : t_2 = \sqrt{g_2} : \sqrt{g_1}$; ist aber r die Entfernung desjenigen Ortes, an welchem die Schwerebeschleunigung g_1 beträgt, vom Erdmittelpunkte, $r + h$ die des anderen, so muss andererseits $g_2 : g_1 = r^2 : (r + h)^2$ sein (82); also ist $t_1 : t_2 = r : (r + h)$.

Durch die Schwingungszeiten gleichlanger Pendel lassen sich also Höhenlagen von Orten bestimmen, wenn man den dem Meeresspiegel entsprechenden Erdradius kennt. Mit dem Pendel hat man die Abplattung der Erde nachgewiesen; mit seiner Hilfe gewinnt man ein Bild der wahren Gestalt der Erdoberfläche.

Zusatz 2. Das Pendel an der Uhr hat den Zweck, die Bewegung eines Rades, welche wegen der Unveränderlichkeit der an diesem wirkenden Kraft (Schwere eines Gewichtes, Spannkraft einer Feder) gleichförmig-beschleunigt wäre, in eine gleichförmige zu verwandeln. Zwei Haken, welche sich an den Enden des an der Pendelstange befestigten Ankers $A_1 A_2$ (Fig. 64) befinden, greifen wechselweise hemmend in die Zähne des Rades R ein, so dass sich dieses bei jeder Pendelschwingung nur um einen Zahn weiter drehen kann. Andererseits erhält das Pendel infolge der am Rade wirkenden Kraft P durch den Zahn, an welchem die Hemmung eingreift, also nach jeder Schwingung einen neuen Antrieb; es schwingt daher so lange, als die Spannkraft eines Gewichtes oder einer Feder an dem Rade wirkt.

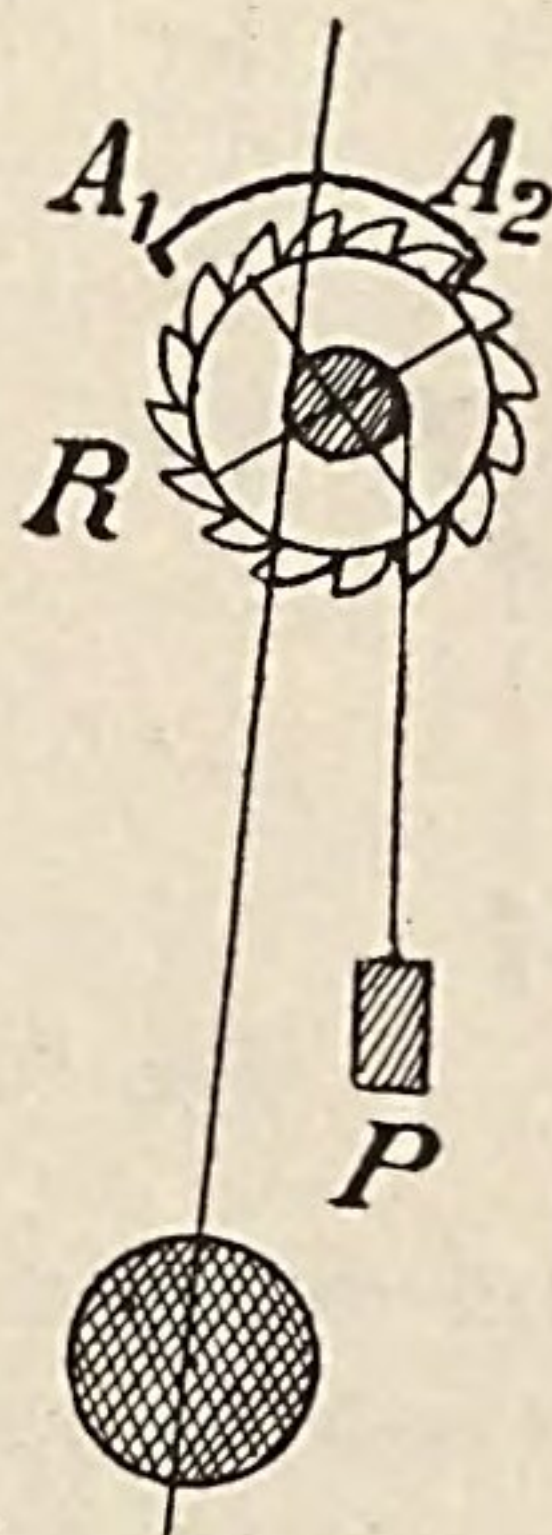


Fig. 64.

Sechster Abschnitt.

Vom Lichte (Optik).

A. Ausbreitung des Lichtes.

84. Leuchtende und dunkle Körper. Fortpflanzungsrichtung des Lichtes. Schatten.

Körper, welche selbst Licht aussenden, die also an und für sich unserem Auge wahrnehmbar sind, heissen selbstleuchtend; zu ihnen gehören die Sonne, die Fixsterne und alle brennenden und glühenden Körper; dagegen nennen wir diejenigen Körper, welche uns erst sichtbar werden, wenn Licht auf sie fällt, dunkel. Je nachdem Licht durch einen Körper unbehindert, teilweise oder gar nicht hindurchdringen kann, heisst er durchsichtig, durchscheinend oder undurchsichtig.

Versuch. Stellt man vor ein Licht einen undurchsichtigen Schirm, der eine kleine Öffnung besitzt, so ist das Licht einem

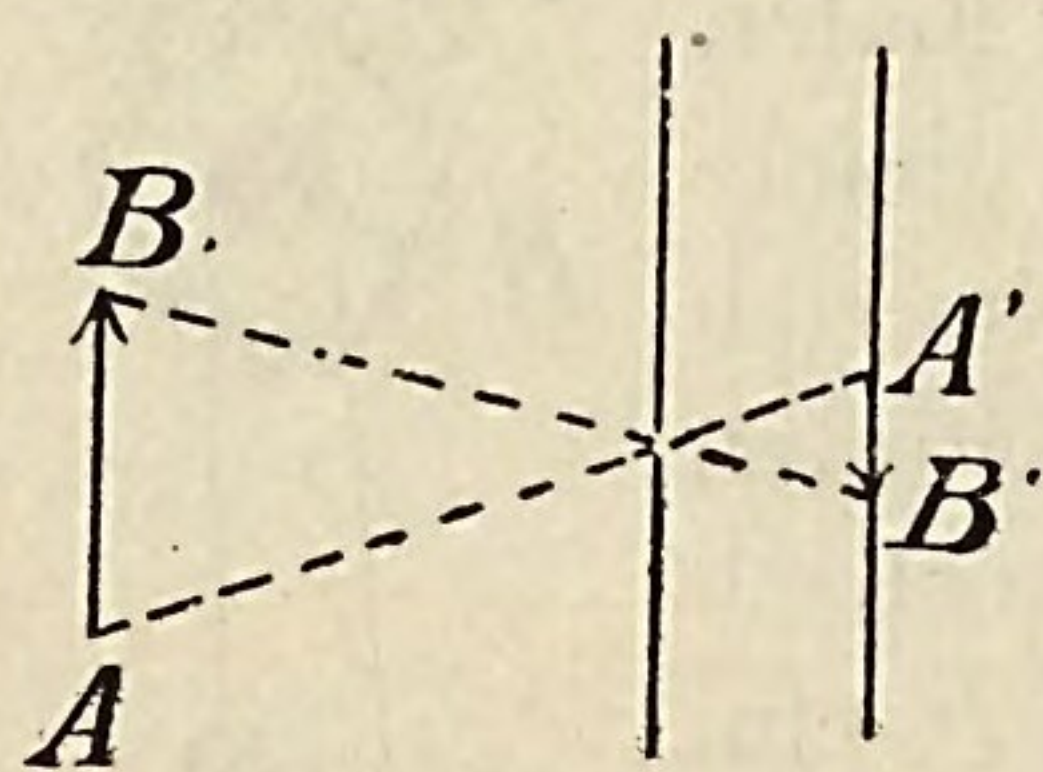


Fig. 65.

Auge hinter dem Schirme nur sichtbar, wenn sich das Licht, die Schirmöffnung und das Auge je in einer geraden Linie befinden. Von einem leuchtenden oder beleuchteten Gegenstande AB (Fig. 65) geht das Licht durch die Öffnung eines Schirmes so hindurch, dass auf einer hinter diesem befindlichen

Wand ein verkehrtes Bild $A'B'$ des Gegenstandes entsteht; wird der Gegenstand in irgend einer Richtung verschoben, so verschiebt sich sein Bild in der entgegengesetzten Richtung; die Grösse des Bildes verhält sich zu der des Gegenstandes wie ihre Entfernungen vom Schirme. (Dunkelkammer.)

Das Licht pflanzt sich also von einem leuchtenden Punkte aus nach allen Richtungen hin in geraden Linien fort.

Eine Lichterscheinung wird daher in allen Punkten einer Kugelfläche, deren Mittelpunkt die Lichtquelle ist, gleichzeitig wahrgenommen.

Von dem Lichte, das von einem leuchtenden Körper S (Fig. 66) auf einen undurchsichtigen Körper E fällt, können in das Stück $ABCD$ des

Raumes hinter dem letzteren, welches durch die gemeinsamen äusseren Tangenten beider Körper begrenzt ist, wegen der geradlinigen Fortpflanzung desselben

keine Strahlen gelangen; dieser Raum

liegt also im Kernschatten. Dasjenige Stück $CHIDFG$ des Raumes hinter dem durchsichtigen Körper, das zwischen den äusseren und inneren gemeinsamen Tangenten beider Körper liegt, erhält nur von einem Teile des leuchtenden Körpers Licht; es befindet sich also im Halbschatten.

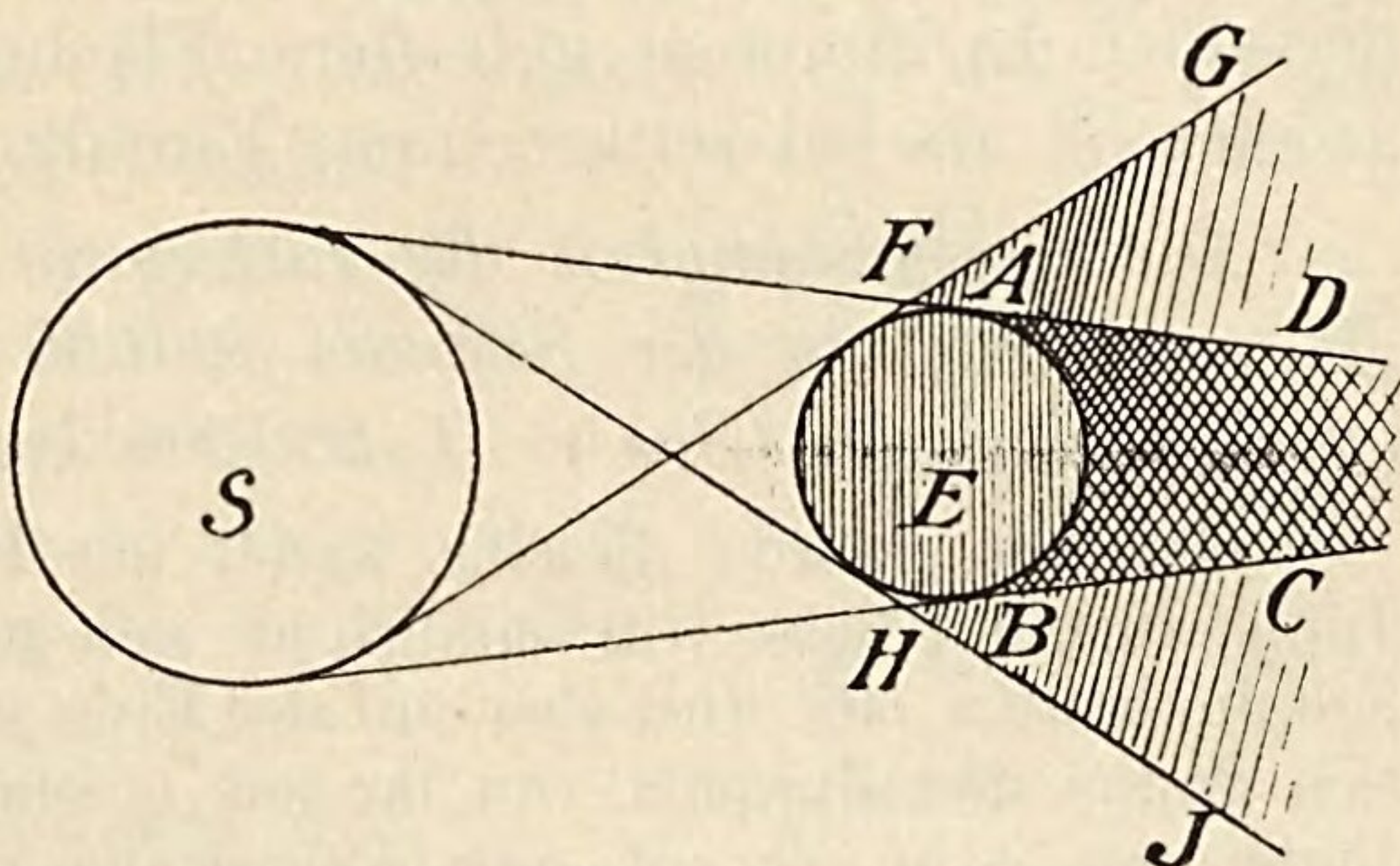


Fig. 66.

85. Lichtstärke. Geschwindigkeit des Lichtes. Lichttheorie.

Lichtstärke nennt man die Lichtmenge, welche auf die Einheit einer zur Achse eines Lichtkegels senkrechten Fläche fällt; sie muss, da das Licht sich von seiner Quelle aus kugelförmig verbreitet (84), der Leuchtkraft der Lichtquelle direkt, dem Quadrate des Abstandes der letzteren von der beleuchteten Fläche verkehrt proportional sein.

Auf Grund dieses Satzes lässt sich die Leuchtkraft verschiedener Lichtquellen mittelst geeigneter Vorrichtungen (Photometer) vergleichen. Man bringt entweder nahe vor einem Schirme einen Stab an und stellt die Lichtquellen, z. B. ein Kerzenlicht und eine Petroleumlampe, so auf, dass die Schatten des Stabes, welche sie auf dem Schirme erzeugen, gleich dunkel sind; oder man verschiebt die Lichtquellen zu beiden Seiten eines Schirmes, auf welchem sich ein Fettfleck befindet, so lange, bis dieser verschwindet, also beiderseits gleich stark beleuchtet ist. In beiden Fällen verhalten sich die Leuchtkräfte der Lichtquellen,

da sie auf dem Schirme gleiche Lichtstärke erzeugen, verkehrt wie die Quadrate der zugehörigen Entfernungen vom Schirme.

Zusatz. Fällt ein Bündel paralleler Lichtstrahlen unter einem schiefen Winkel auf eine Ebene, so nimmt die Lichtstärke proportional dem Sinus dieses Winkels ab, weil die von derselben Lichtmenge getroffene Fläche in diesem Verhältnisse grösser ist als bei senkrechtem Einfall des Lichtes.

Die Geschwindigkeit des Lichtes in der Luft wie im freien Raume beträgt in der Sekunde 300 000 km; in dichteren Mitteln ist sie kleiner, in Glas z. B. 200 000 km.

Gemessen wurde dieselbe zuerst mit Hilfe der Verfinsterung der Jupitermonde; diese tritt nämlich an sich genommen stets nach gleichen Zeitabschnitten ein, wird aber auf der Erde später wahrgenommen, wenn sich Sonne und Jupiter von ihr aus gesehen in gleicher Richtung befinden, als wenn sie auf entgegengesetzten Seiten der Erde stehen, weil das von dem Jupitermonde zurückgestrahlte Sonnenlicht im ersteren Falle einen um den Erdbahndurchmesser grösseren Weg zurückzulegen hat; aus der Länge dieses Durchmessers und der Zeit, um welche der Mond scheinbar später aus dem Kernschatten des Jupiter tritt, lässt sich die Lichtgeschwindigkeit berechnen.

Den gleichen Wert fand man auch durch Versuche auf der Erdoberfläche. Lässt man Licht durch die Lücken eines Zahnrades senkrecht auf einen Spiegel fallen, so wird es von diesem ebenso zurückgeworfen (86.), trifft aber bei entsprechender Umdrehungsgeschwindigkeit des Rades nach der Rückkehr auf die Zähne desselben, so dass dieses kein Licht mehr hindurchlässt, also dunkel erscheint. Das Licht hat dann in derselben Zeit, in der sich das Rad um einen Zahn drehte, den Weg vom Rad zum Spiegel und wieder zurück gemacht; aus diesen messbaren Grössen ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit.

Die Lichterscheinungen lassen sich ebenso, wie die der Wärme, auf doppelte Art erklären; Licht ist entweder selbst ein sehr feiner Stoff, der von den Lichtquellen nach allen Richtungen hin ausgesandt wird (Emanationstheorie) oder es ist eine Wellenbewegung eines sehr feinen, alle Körper durchdringenden Stoffes, des Lichtäthers (Undulationstheorie). Für die letztere Annahme spricht schon die grosse Geschwindigkeit des Lichtes; allgemein anerkannt wurde sie seit dem Bekanntwerden der Thatsache, dass Licht durch Licht unter Umständen ausgelöscht werden kann (Interferenzerscheinungen). Die Lichtwellen schwingen transversal, ihre Wellenlänge bestimmt die Farbe, ihre Schwingungsweite die Stärke des Lichtes.

B. Zurückwerfung des Lichtes. (Katoptrik.)

86. Ebene Spiegel.

Versuch. a) Ein ebener Spiegel, d. h. eine glatt und eben abgeschliffene Glas- oder Metallplatte AB (Fig. 67 im Grundrisse) ist um eine vertikale Achse C drehbar; ihm gegenüber befindet sich eine Wand MN in Gestalt des halben Mantels eines Kreiscylinders, dessen Achse die Drehungsachse des Spiegels ist; in der Mitte dieser Wand ist ein schmaler Spalt O angebracht und von diesem aus sind auf der Innenseite der Wand zu beiden Seiten die Bogengrade von 0 bis 90 aufgetragen; endlich ist mit dem Spiegel ein Zeiger CD so verbunden, dass er immer auf der Spiegelebene senkrecht steht.

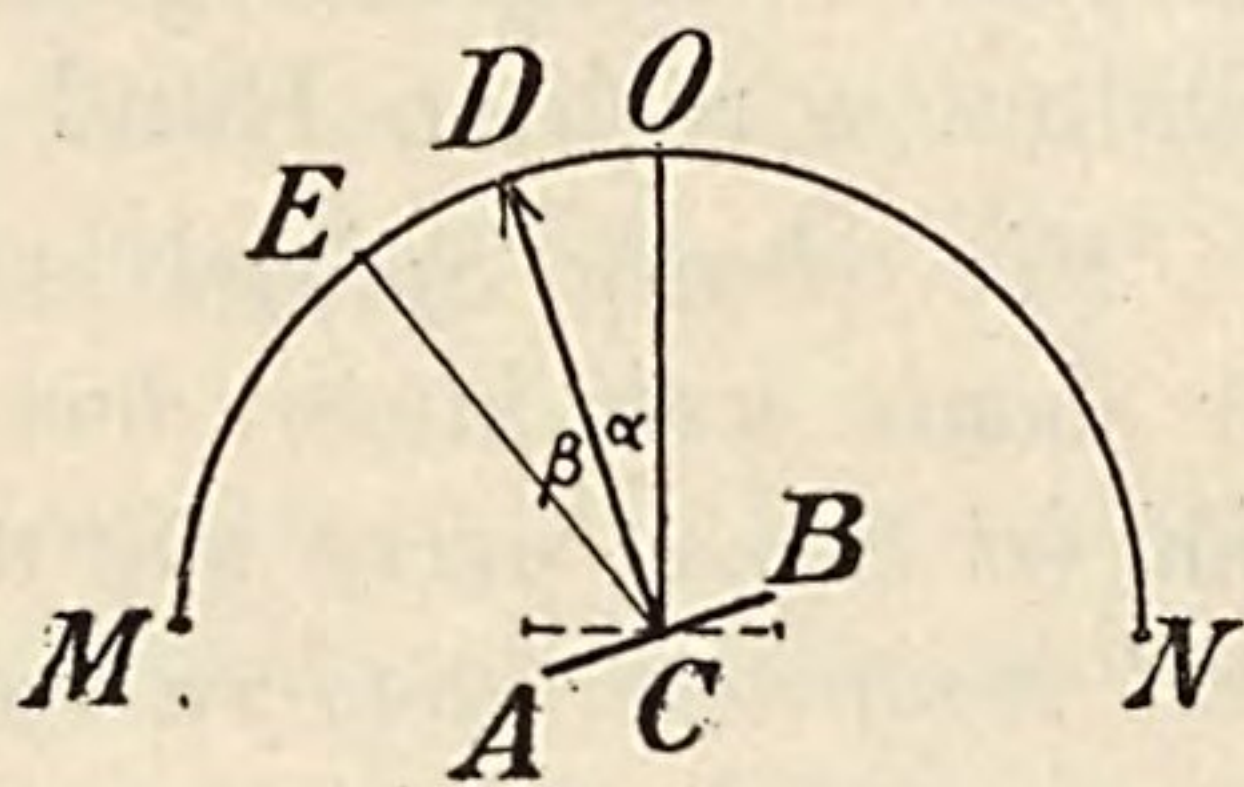


Fig. 67.

Lässt man nun Licht durch den Spalt fallen, stellt den Spiegel zunächst so, dass Lichtstrahlen von der Richtung OC ihn senkrecht treffen, und dreht dann den Spiegel um seine Achse, so erscheint bei jeder bestimmten Stellung des Spiegels ein bestimmter Teilstrich des Cylindermantels scharf beleuchtet und zwar ist stets der Bogen OD vom Spalte bis zum Zeiger des Spiegels ebenso gross wie der Bogen DE von diesem bis zum beleuchteten Teilstriche.

Lichtstrahlen, welche auf einen ebenen Spiegel fallen, werden von diesem zurückgeworfen; der einfallende und der zurückgeworfene Lichtstrahl liegen mit dem Einfallslot, d. h. mit der Geraden, welche auf der Spiegelebene im Treffpunkte senkrecht steht, in einer Ebene, aber auf entgegengesetzten Seiten desselben und bilden mit ihm gleiche Winkel; der „Reflexionswinkel“ β ist dem „Einfallswinkel“ α gleich. (Fig. 67.)

Der Winkel, welchen der reflektierte mit dem einfallenden Strahle bildet, ist demnach immer doppelt so gross als der Winkel, um welchen der Spiegel aus seiner Anfangslage gedreht wurde.

Versuch. b) Vor einer polierten, auf beiden Seiten unbedeckten Glasplatte befindet sich eine brennende Kerze; stellt man sich nun so vor die Kerze, dass die Gerade vom Auge zur

Flamme auf der Glasplatte senkrecht steht, so sieht man hinter der Glastafel ein Bild der Kerze an einer bestimmten Stelle; bringt man an diese Stelle eine zweite, nicht brennende Kerze von gleicher Grösse mit der ersteren, so hat man den Eindruck, als ob die zweite Kerze auch brennte. Misst man die Entfernungen der beiden Kerzen vom Spiegel, so findet man, dass dieselben stets gleich gross sind. Das Bild der vor den Spiegel gehaltenen rechten Hand ist kongruent mit der Linken.

Ein ebener Spiegel erzeugt von jedem Gegenstande ein Bild, das ebenso weit hinter dem Spiegel steht, als dieser vor ihm; das Bild ist ebenso gross wie der Gegenstand, steht aufrecht, ist aber nicht kongruent, sondern symmetrisch mit dem Gegenstande.

Bemerkung. Gesetz *b* folgt aus *a*. Von einem leuchtenden Punkte *A* (Fig. 68) fallen nämlich unzählig viele Strahlen auf einen

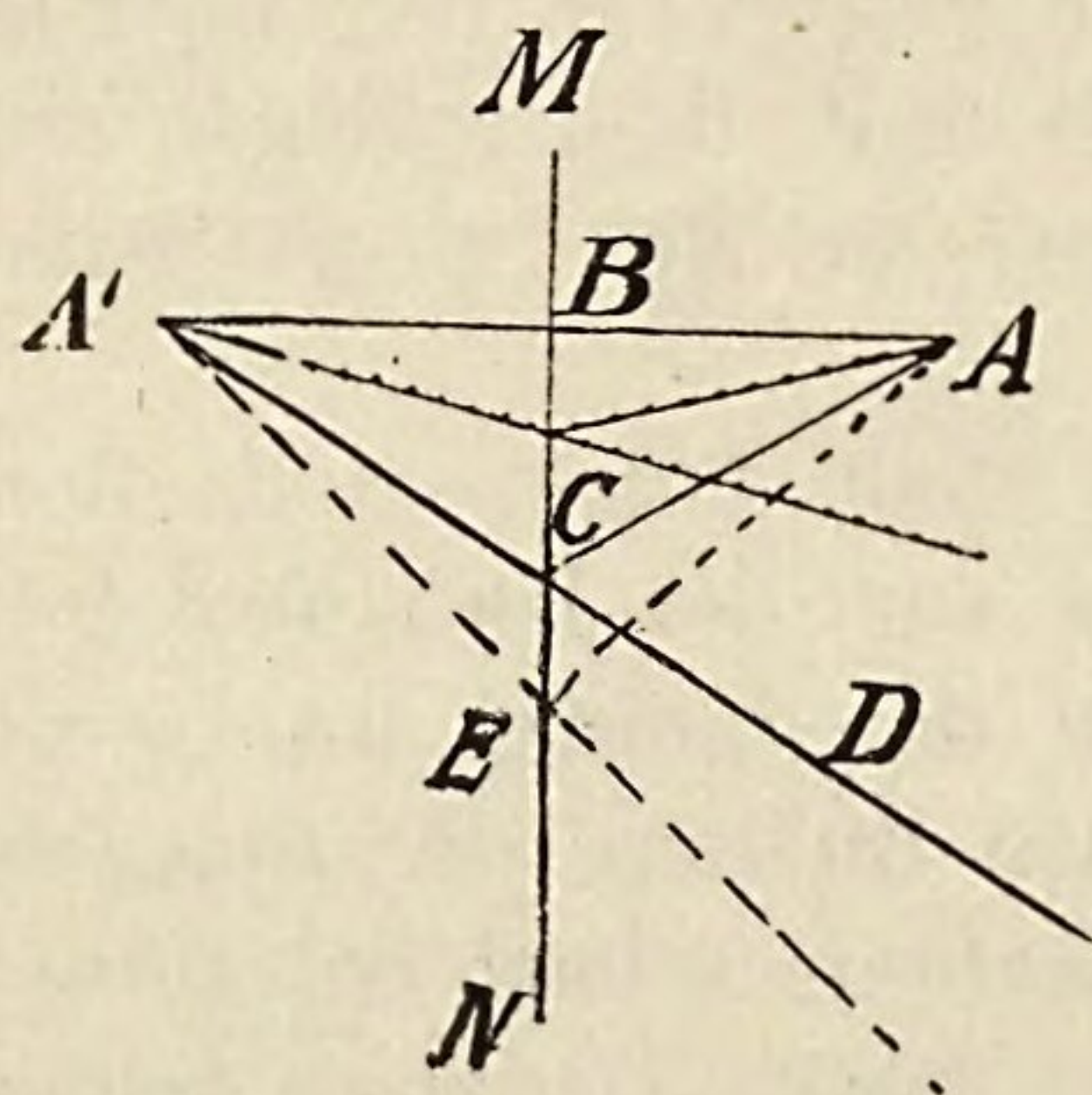


Fig. 68.

ebenen Spiegel *MN*; ist nun *AC* irgend einer derselben, *CD* der zugehörige reflektierte Strahl und verlängert man diesen hinter dem Spiegel bis zum Schnittpunkte *A'* mit der Senkrechten von *A* auf *MN*, so ist $\angle ACB = \angle DCN$ (86 a) $= \angle BCA'$; also $\triangle ACB \cong \triangle A'CB$ und folglich $AB = BA'$; ebenso ist aber für einen beliebigen anderen Strahl z. B. *AE*, das $\triangle AEB \cong \triangle A'EB$. Alle vom Punkte *A* ausgehenden Strahlen werden also vom Spiegel so zurückgeworfen, als gingen sie von einem Punkte *A'*

aus, der ebensoweit hinter dem Spiegel liegt wie *A* vor demselben; man nennt deshalb den Punkt *A'* das virtuelle oder subjektive Bild von *A*.

87. Unebene Spiegel.

Von den unebenen Spiegeln sind die gebräuchlichsten diejenigen, deren spiegelnde Fläche ein Stück einer Kugel ist; der Mittelpunkt der Kugel heisst Krümmungsmittelpunkt, der Mittelpunkt der spiegelnden Fläche optischer Mittelpunkt, die Gerade durch diese beiden Punkte die Hauptachse des Spiegels. Je nachdem das Licht an der inneren oder äusseren Seite einer Kugelhaube zurückgeworfen wird, heisst der Spiegel Hohlspiegel oder erhabener Spiegel.

a) Hohlspiegel.

Versuche. a) Sonnenstrahlen werden von einem Hohlspiegel so zurückgeworfen, dass sie einen in staubreicher oder mit Rauch gefüllter Luft deutlich wahrnehmbaren Doppelkegel bilden, dessen Spitze vor dem Spiegel liegt. Fallen die Strahlen parallel zur Hauptachse des Spiegels auf denselben, so ist die Spitze des reflektierten Lichtkegels ein bestimmter Punkt der Hauptachse; man nennt ihn den Brennpunkt des Spiegels und seine Entfernung vom optischen Mittelpunkte die Brennweite desselben.

Bringt man umgekehrt im Brennpunkte eines Hohlspiegels eine Lichtquelle an und fängt die reflektierten Strahlen mittelst eines auf der Hauptachse senkrecht stehenden Schirmes auf, so zeigt sich auf diesem ein heller Kreis, dessen Durchmesser sich nicht ändert, wenn man den Schirm parallel zu sich selbst verschiebt.

Strahlen, welche parallel zur Hauptachse eines Hohlspiegels auf diesen fallen, gehen nach der Reflexion durch den Brennpunkt desselben; Strahlen, welche aus dem Brennpunkte eines Hohlspiegels auf denselben fallen, werden parallel zur Hauptachse zurückgeworfen.

Die Brennweite f eines Hohlspiegels ist halb so gross als sein Krümmungsradius r ; also

$$f = \frac{1}{2} r.$$

Bemerkung. Da eine krumme Fläche ein aus sehr vielen, sehr kleinen Ebenen bestehendes Gebilde ist, so sind diese Sätze eine Folge der Gesetze über die ebenen Spiegel.

Ist nämlich C (Fig. 69) der Krümmungsmittelpunkt, O der optische Mittelpunkt, so muss ein Strahl BD , welcher parallel zu CO einfällt, da DC sein Einfallslot ist, so in der Richtung DF zurückgeworfen werden, dass $\angle FDC = \angle BDC$ ist; da aber $\angle BDC = \angle DCF$, so ist $\angle FDC = \angle DCF$, also $FD = FC$. Liegt nun D sehr nahe bei O , so ist nahezu $FO = FD$; dann ist aber $FO = FC = \frac{1}{2} OC$.

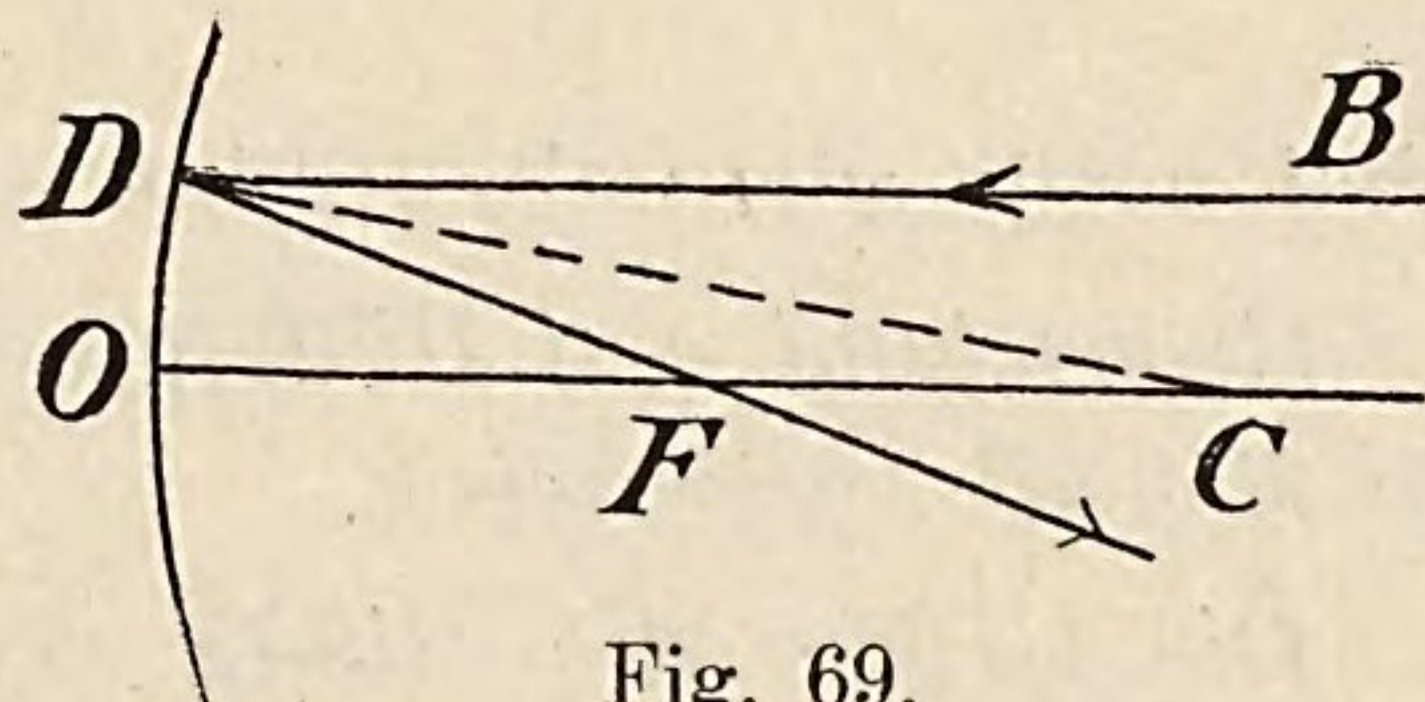


Fig. 69.

Versuch. b) Stellt man vor einem kugelförmigen Hohlspiegel einen leuchtenden Gegenstand auf, so gibt der Spiegel ein Bild desselben, das je nach der Entfernung des Gegenstandes vom Spiegel verkleinert oder vergrößert, verkehrt oder aufrechtstehend, vor dem Spiegel, also auffangbar, reell, oder

hinter dem Spiegel, also virtuell ist. Versuche an der optischen Bank, einer festen, mit Masstab versehenen Doppelschiene aus Holz von etwa 3 m Länge, auf welcher der leuchtende Gegenstand, der Spiegel und eine Wand zum Auffangen der Bilder beliebig eingestellt werden können, ergeben folgende Beziehungen:

<i>Steht der Gegenstand</i>	<i>so ist das Bild</i>
<i>ausserhalb des Krümmungsmittelpunktes,</i>	<i>verkehrt, verkleinert, vor dem Spiegel, also reell, zwischen dem Krümmungsmittelpunkte und dem Brennpunkte;</i>
<i>im Krümmungsmittelpunkte,</i>	<i>verkehrt, gleich gross, reell, in gleicher Entfernung wie der Krümmungsmittelpunkt;</i>
<i>zwischen dem Krümmungsmittelpunkte und dem Brennpunkte,</i>	<i>verkehrt, vergrössert, reell, ausserhalb des Krümmungsmittelpunktes;</i>
<i>im Brennpunkte,</i>	<i>unendlich gross, unendlich fern, d. h. es entsteht kein Bild;</i>
<i>innerhalb des Brennpunktes,</i>	<i>aufrechtstehend, vergrössert, hinter dem Spiegel, also virtuell.</i>

Zwischen der Entfernung des Gegenstandes vom Spiegel, der Gegenstandsweite a , der Entfernung des Bildes vom Spiegel, der Bildweite b , und der Brennweite f besteht (näherungsweise) die Gleichung

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

wobei b für virtuelle Bilder negativ ist.

Gegenstand und Bild lassen sich also in Bezug auf ihre Lage zum Spiegel vertauschen.

Die Grösse des Bildes verhält sich zu der des Gegenstandes wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

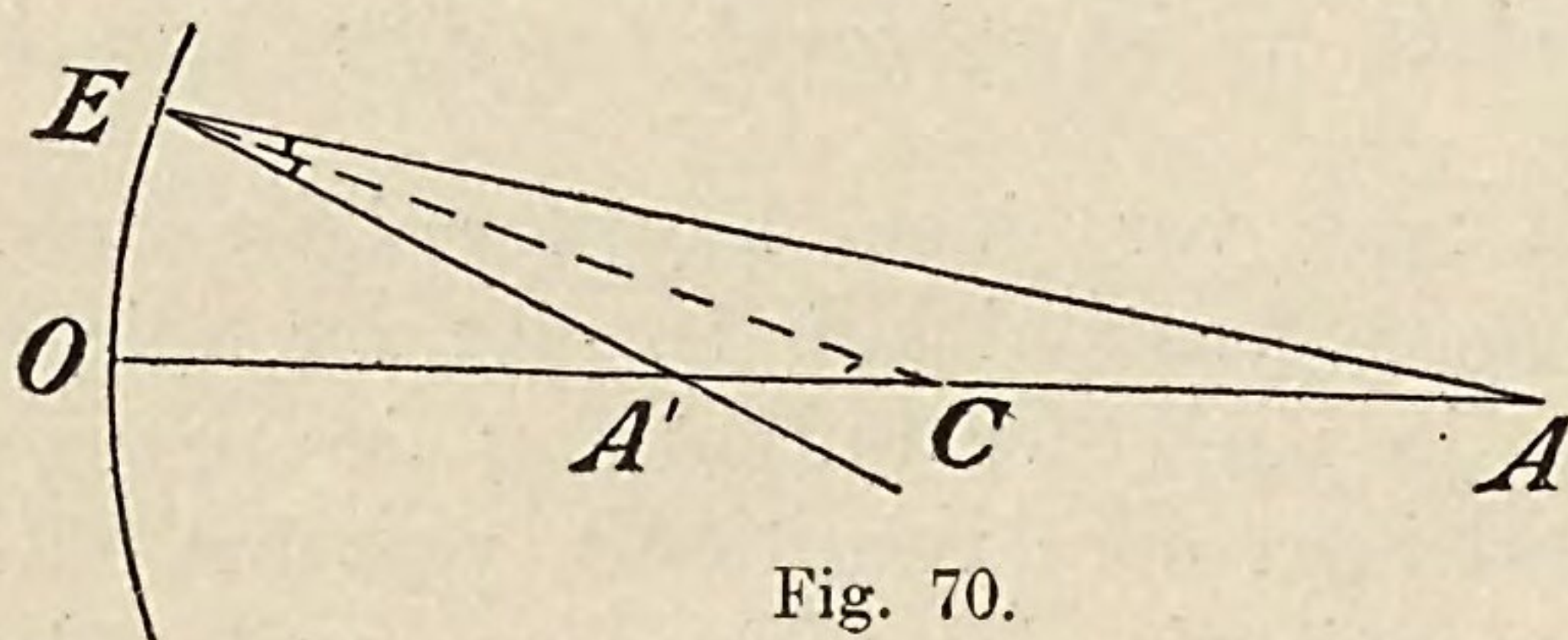


Fig. 70.

Bemerkung. Diese Gesetze ergeben sich aus den obigen (86a und 87a). Ist A (Fig. 70) ein leuchtender Punkt auf der Hauptachse, C Krümmungs-, O optischer Mittelpunkt, so muss der Strahl AO

durch den Spiegel in sich selbst zurückgeworfen werden, weil er mit seinem Einfallslot zusammenfällt; irgend ein anderer Strahl AE wird nach EA' reflektiert; der Punkt A' der Hauptachse, in welchem sich diese beiden sowie alle von A auf den Spiegel fallenden Strahlen nach der Spiegelung schneiden, ist also das Bild von A . Da nun CE das Einfallslot des Strahles AE ist, so muss $\sphericalangle AEC = \sphericalangle CEA'$ sein und folglich $CA':CA = EA':EA$; liegt aber E nahe bei O , so ist nahezu $EA' = OA'$ und $EA = OA$, also $CA':CA = OA':OA$ oder $(2f-b):(a-2f) = b:a$;

also
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Von den unzähligen Strahlen, die irgend ein nicht auf der Hauptachse liegender Punkt B des leuchtenden Gegenstandes AB (Fig. 71 a) auf den Spiegel wirft, wird der Strahl BC in sich selbst zurückgeworfen, der Strahl BD , welcher der Hauptachse parallel ist, aber durch den Brennpunkt F reflektiert; der Schnittpunkt B' von CB und DF ist also das Bild

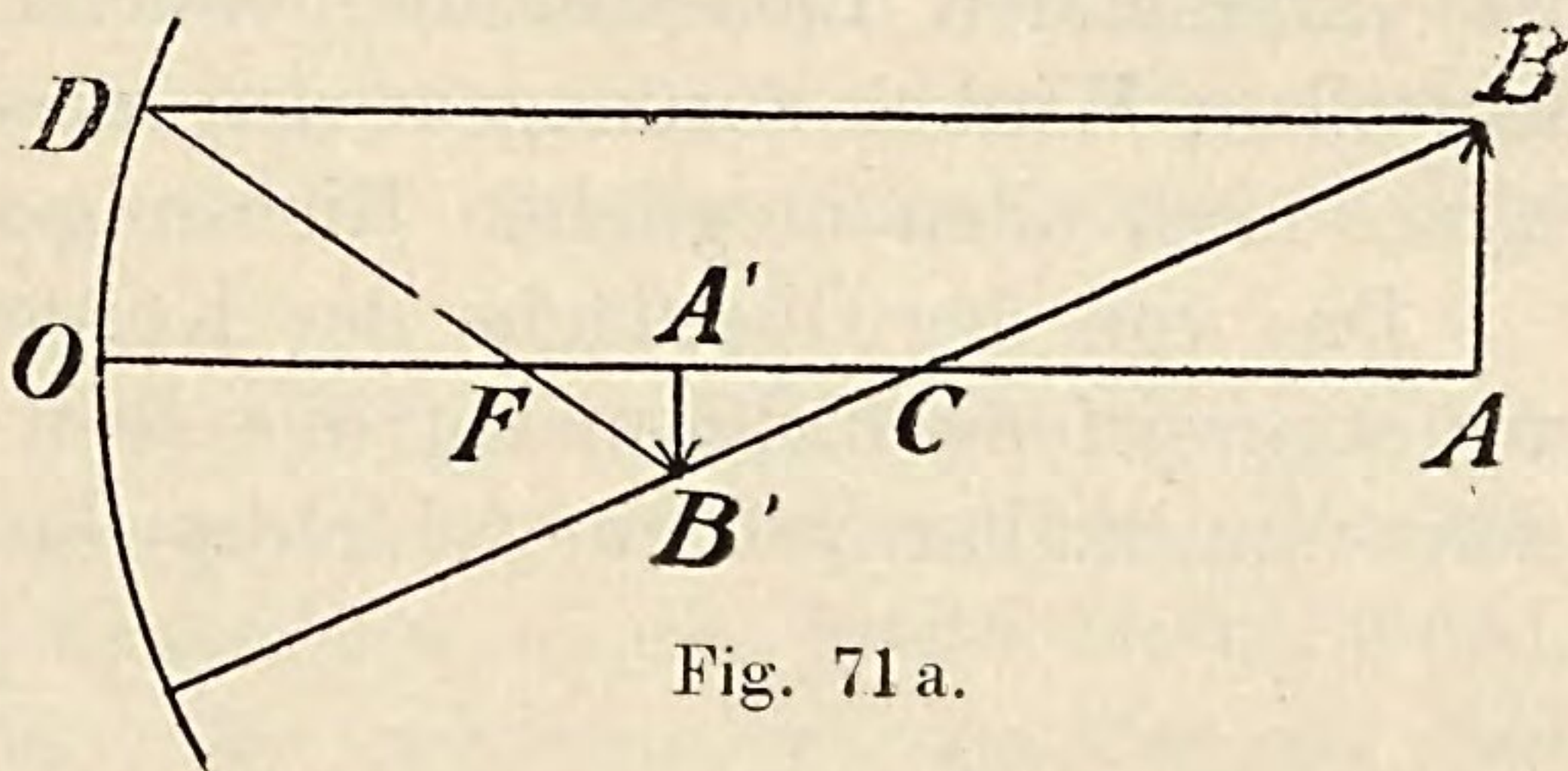


Fig. 71 a.

von B , $A'B'$ das des Gegenstandes AB . Da nun $\triangle A'B'C \sim \triangle ABC$, so ist $A'B':AB = CA':CA$ oder nach Obigem $A'B':AB = OA':OA$.

b) Erhabene Spiegel.

Versuch. Sonnenstrahlen werden von einem erhabenen Spiegel so zurückgeworfen, dass sie einen Kegel bilden, dessen Spitze aber hinter dem Spiegel liegt, also ein virtueller Punkt ist; fallen die Strahlen parallel zur Hauptachse auf den Spiegel, so liegt dieser Punkt auf der Hauptachse und heisst dann ebenfalls Brennpunkt des Spiegels. Strahlen, welche parallel zur Hauptachse eines erhabenen Spiegels auf diesen fallen, werden so zurückgeworfen, als ob sie aus dem hinter dem Spiegel liegenden Brennpunkte kämen.

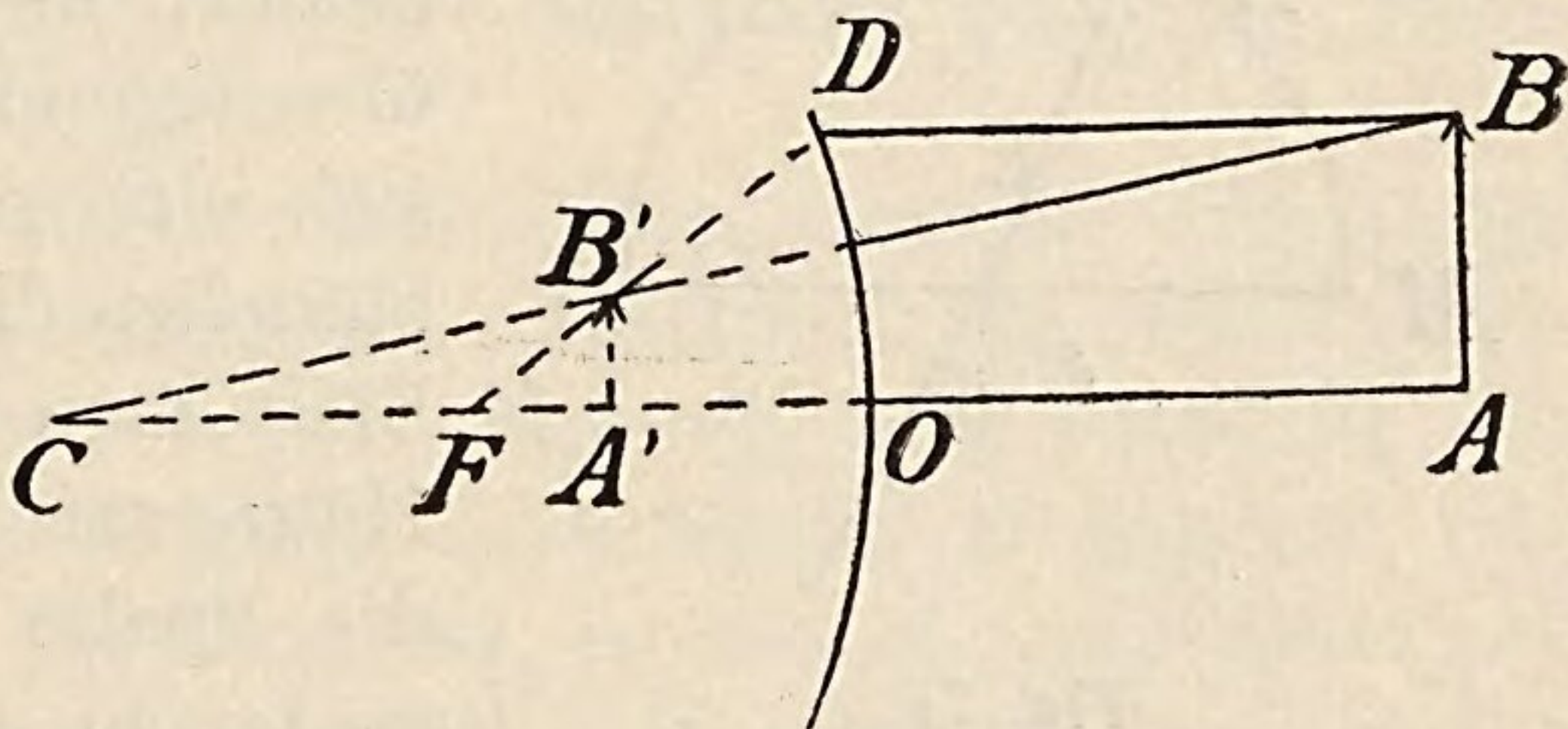


Fig. 71 b.

Das Bild $A'B'$ (Fig. 71 b) eines vor einem erhabenen Spiegel stehenden Gegenstandes AB ist immer aufrecht, verkleinert, virtuell und liegt stets innerhalb der Brennweite.

Die Gleichung $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ gilt auch für erhabene Spiegel; aber sowohl b als auch f sind stets negativ.

c) Zurückwerfung des Lichtes an unregelmässig gekrümmten Flächen.

Fällt Licht auf eine unregelmässig gekrümmte Fläche, so wird es nach allen Richtungen hin zurückgeworfen. Die unendlich kleinen Ebenen, aus welchen eine krumme Fläche besteht, haben im allgemeinen alle möglichen Lagen; daher müssen die auffallenden Lichtstrahlen, welche an jeder Ebene unter demselben Winkel zurückgeworfen werden, unter dem sie auffallen, nach allen möglichen Richtungen hin reflektiert werden.

Das von der Oberfläche der Körper nach allen Richtungen zurückgeworfene Licht macht dieselben sichtbar, auch wenn sie nicht unmittelbar von einer Lichtquelle beleuchtet werden.

C. Brechung des Lichtes. (Dioptrik.)

88. Übergang des Lichtes von einem Mittel in ein anderes. Totale Reflexion.

Versuch. Ein Blechgefäss hat die Gestalt eines halben Kreiscylinders MN (Fig. 72 im Grundrisse); die Innenseite des Cylindermantels ist von seiner Mitte aus nach beiden Seiten hin in je 90° geteilt; in der Mitte C der gegenüberliegenden ebenen Wand befindet sich eine schmale, mit einem Glasplättchen dicht verschlossene Spalte. Füllt man nun dieses Gefäss zur Hälfte mit Wasser und lässt durch die Spalte Lichtstrahlen zunächst senkrecht zur Glasplatte einfallen, so erscheint sowohl im Wasser als

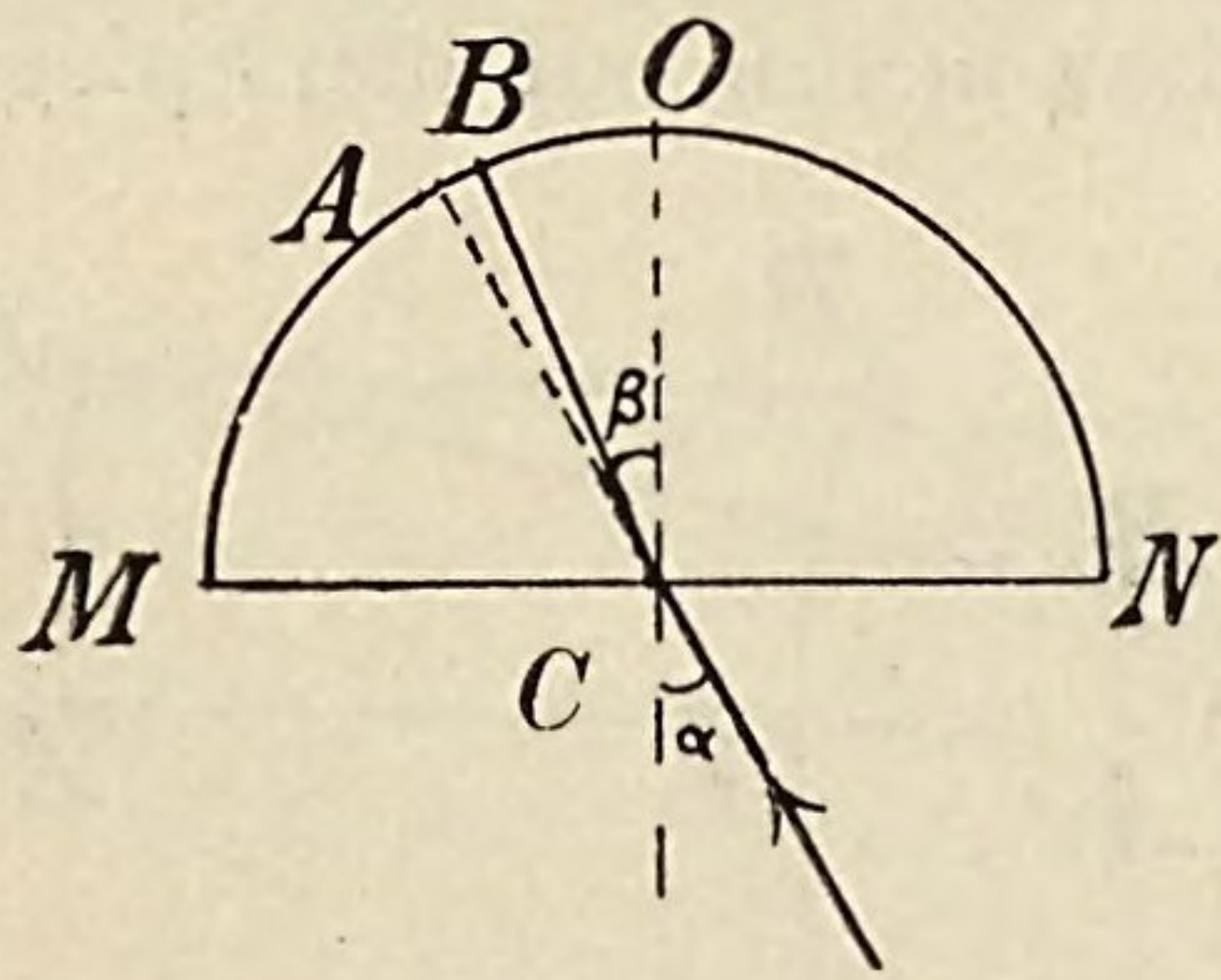


Fig. 72.

auch ausserhalb desselben der Teilstrich Null hell beleuchtet. Dreht man aber nun das Gefäss um die durch den Spalt C bestimmte Gerade, so dass die Lichtstrahlen schief einfallen, so wird im Wasser ein näher beim Nullpunkte liegender Teilstrich beleuchtet als ausserhalb desselben. Ein Lichtstrahl erfährt also

beim Übergange von Luft im Wasser eine Ablenkung von seiner Richtung.

Der Bogen OA vom Nullpunkte bis zu dem ausserhalb des Wassers beleuchteten Teilstriche misst nun den Einfallswinkel des Lichtstrahles, d. h. den Winkel, welchen dieser ausserhalb des Wassers mit dem Einfallslote bildet; ebenso ist der Bogen OB vom Nullpunkte bis zu dem im Wasser beleuchteten Teilstriche das Mass für den Brechungswinkel des Lichtstrahles, d. h. für den Winkel, welchen letzterer im Wasser mit demselben Einfallslote einschliesst. Zu einem bestimmten Einfallswinkel gehört stets auch ein bestimmter Brechungswinkel; stellt man eine Reihe von solchen zusammengehörigen Winkelpaaren neben einander, so findet man, dass der Quotient ihrer Sinusse eine unveränderliche Grösse ist.

Lichtstrahlen werden beim Übergange von einem Mittel in ein anderes von ihrer Richtung abgelenkt; von den beiden Winkeln, welche ein Strahl mit dem Einfallslote in den beiden Mitteln bildet, ist der im dünneren Mittel der grössere; der Quotient aus dem Sinus des „Einfallswinkels“ α durch den Sinus des „Brechungswinkels“ β (Fig. 70) hat für zwei bestimmte Mittel immer den gleichen Wert; man nennt ihn ihren Brechungsexponenten.

Beispielsweise ist der Brechungsexponent beim Übergange des Lichtes von Luft in Wasser 1,34 (rund $\frac{4}{3}$), von Luft in Crown Glas 1,53 (rund $\frac{3}{2}$), in Flintglas 1,6—2,0.

Eine Folge der Lichtbrechung ist die Erscheinung, dass ein unter Wasser gehaltener Stab gebrochen erscheint, sowie die, dass ein unter Wasser befindlicher Gegenstand höher zu liegen scheint, als er wirklich liegt.

Auch die atmosphärische Strahlenbrechung ist eine Folge der Lichtbrechung. Durchläuft ein Lichtstrahl die Atmosphäre der Erde, so wird er von seiner ursprünglichen Richtung um so mehr abgelenkt, in je dichtere Luftschichten er gelangt; das Auge sieht ihn aber in der Richtung, welche er unmittelbar vor demselben angenommen hat; deshalb erscheint ein leuchtender Gegenstand höher über dem Horizonte zu sein als er es ist.

Ein Lichtstrahl, welcher durch eine von zwei parallelen Ebenen begrenzte Glasplatte hindurchgeht, wird parallel zu seiner ursprünglichen Richtung verschoben, wenn sich auf beiden Seiten der Glasplatte dasselbe Mittel befindet; denn er wird beim Verlassen des Glases ebenso stark vom Einfallslote abgelenkt, als er beim

Eintritte in dasselbe gegen das parallele Einfallslot hin gebrochen wurde.

Versuch. Lässt man ein schmales Bündel Lichtstrahlen von unten her in ein mit Wasser gefülltes Glas so fallen, dass sie an der Oberfläche des Wassers unter einem Einfallswinkel von mehr als etwa 48° eintreffen, so kommen sie aus dem Wasser an der Oberfläche nicht heraus, sondern werden an ihr in das Wasser zurückgeworfen.

Lichtstrahlen, welche aus einem Mittel an ein dünneres gelangen, werden, sobald der Einfallswinkel eine bestimmte Grösse überschreitet, nicht mehr in das dünnere Mittel herausgebrochen, sondern in das dichtere Mittel vollständig zurückgeworfen. Diese Erscheinung bezeichnet man als totale Reflexion und nennt den Winkel, bei dessen Überschreitung sie eintritt, den Grenzwinkel. Auch bei dieser Reflexion ist der Brechungswinkel dem Einfallswinkel gleich.

Bildet ein Lichtstrahl an der Grenze von Wasser und Luft mit dem Einfallslot in ersterem den $\angle \beta$, in letzterem den $\angle \alpha$, so ist nach Obigem $\sin \alpha : \sin \beta = \frac{4}{3}$; nun wird $\alpha \geq 90^\circ$, wenn $\sin \beta \geq \frac{3}{4}$, also $\beta \geq 48^\circ 30'$ ist; dieser Winkel ist also der Grenzwinkel für Wasser und Luft; ebenso findet man als Grenzwinkel für Crown Glas und Luft rund 41° , für Flintglas und Luft 37° .

Auf totaler Reflexion des Lichtes beruht auch die Erscheinung, dass ein schief unter Wasser gehaltenes Reagenzglaschen metallisch glänzend erscheint; das Licht, welches durch das Wasser geht und auf die in dem Gläschen befindliche Luft trifft, wird an der Grenze zurückgeworfen.

Lichtstrahlen, welche in der Atmosphäre beim Übergange in Luftschichten von abnehmender Dichte fortwährend Brechungen erleiden, können schliesslich an sehr warmen, also sehr dünnen Luftschichten in einer den Grenzwinkel überschreitenden Richtung auffallen, werden dort reflektiert und veranlassen dadurch Luftspiegelungen. (Fata Morgana.)

89. Das optische Prisma.

Optisches Prisma heisst jeder durchsichtige Körper von prismatischer Gestalt; die Grundfläche ist in den meisten Fällen ein gleichseitiges oder ein gleichschenkelig-rechtwinkliges Dreieck.

Lässt man einen (einfarbigem) Lichtstrahl auf eine Seite desselben auffallen, so wird er im allgemeinen sowohl bei seinem

Eintritte in das Prisma als auch beim Verlassen desselben und zwar beide Male im gleichen Sinne gebrochen; ein leuchtender Gegenstand erscheint infolge dessen durch ein Prisma gegen die brechende Kante hin verschoben, d. h. gegen die Schnittlinie der beiden Seiten, an welchen die Lichtstrahlen ein- und austreten.

Der Winkel, um welchen ein Lichtstrahl durch ein Prisma aus seiner Richtung abgelenkt wird, ist durch den Einfallswinkel des Strahles, den brechenden Winkel und den Brechungs-exponenten des Prismas bestimmt.

Dies ergibt sich aus Versuchen, ist aber auch eine notwendige Folge der vorhergehenden Gesetze über die Lichtbrechung; bildet nämlich der Strahl mit dem Einfallslot in B , wo er in das Prisma eintritt (Fig. 73), die Winkel α_1, β_1 an der Austrittsstelle C die Winkel α_2, β_2 , so ergibt sich aus den Gleichungen $\sin \alpha_1 : \sin \beta_1 = n$; $\sin \alpha_2 : \sin \beta_2 = n$ und $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$ ($= 180 - \delta$) bei gegebenem n und γ zu jedem Werte von α_1 ein bestimmter Wert von α_2 . Der Ablenkungswinkel ε ist aber Aussenwinkel des Dreiecks BEC ; also $\varepsilon = \alpha_1 - \beta_1 + \alpha_2 - \beta_2 = \alpha_1 + \alpha_2 - \gamma$.

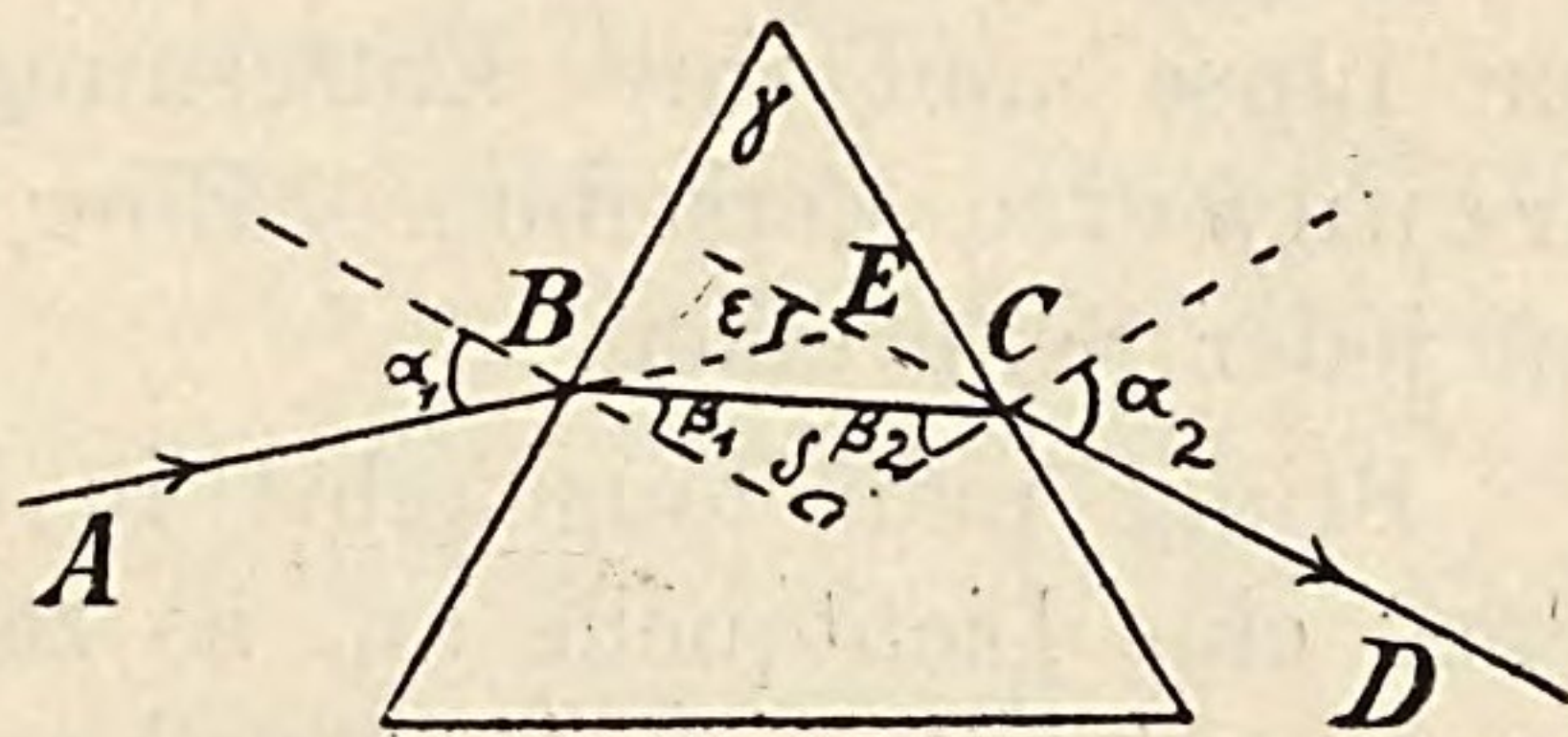


Fig. 73.

Lichtstrahlen können aber auf ein Prisma auch so auffallen, dass sie zwar an der Seite, an welcher sie einfallen, gebrochen, an der zweiten aber total reflektiert werden; in diesem Falle treten sie bei einem dreiseitigen Prisma an der dritten Seite (im allgemeinen) gebrochen heraus; der Gegenstand erscheint dann verkehrt. Ein Lichtstrahl, welcher senkrecht auf eine Seitenfläche eines gleichseitigen oder auf eine Kathetenfläche eines gleichschenkelig-rechtwinkligen Prismas auffällt, wird total reflektiert und verlässt das Prisma ungebrochen.

90. Optische Linsen.

Optische Linse nennt man jeden durchsichtigen Körper, welcher von zwei Kugelhauben begrenzt ist; die Mittelpunkte der Kugeln heissen die Krümmungsmittelpunkte, die Gerade, auf welcher diese liegen, die Hauptachse der Linse; sind die beiden Kugelradien gleich, so heisst der Mittelpunkt des innerhalb der Linse liegenden Stückes der Achse ihr optischer Mittelpunkt. Eine Linse heisst bikonvex, wenn ihre

Begrenzungsflächen nach aussen erhaben sind, bikonkav, wenn sie beiderseits nach aussen hohl sind; tritt an die eine Stelle der Kugelhaube eine Ebene, so nennt man die Linse plankonvex, bzw. plankonkav.

a) Bikonvexe Linsen.

Versuche. Sonnenstrahlen, welche auf eine bikonvexe Linse fallen, bilden hinter derselben einen Doppelkegel; solche Linsen heissen deshalb Sammellinsen. Sind die einfallenden Strahlen parallel zur Hauptachse, so liegt die Spitze des Lichtkegels ebenfalls auf dieser Achse; sie heisst Brennpunkt der Linse und ihre Entfernung vom optischen Mittelpunkte Brennweite derselben. Eine Linse hat zwei Brennpunkte, auf jeder Seite einen.

Bringt man umgekehrt in dem einen Brennpunkte einer Linse eine Lichtquelle an, so zeigt sich auf einem jenseits der Linse senkrecht zur Hauptachse stehenden Schirme ein heller Kreis, dessen Durchmesser sich bei paralleler Verschiebung des Schirmes nicht ändert.

Strahlen, welche parallel zur Hauptachse einer bikonvexen Linse auf diese fallen, werden durch diese so gebrochen, dass sie sich in dem auf der anderen Seite der Linse liegenden Brennpunkte schneiden. Strahlen, welche aus einem Brennpunkte einer Linse auf dieselbe fallen, kommen auf der anderen Seite der Linse parallel zur Hauptachse heraus.

Die Lage der Brennpunkte einer Linse hängt nicht bloss von ihren Krümmungsradien, sondern auch von ihrem Brechungs-exponenten ab.

Versuch. Befindet sich auf der einen Seite einer bikonvexen Linse ein leuchtender Gegenstand, so erzeugt diese ein Bild desselben, das je nach der Entfernung des Gegenstandes von der Linse verkleinert oder vergrössert, verkehrt oder aufrechtstehend, auf der anderen Seite der Linse, also auffangbar, reell oder auf der nämlichen Seite wie der Gegenstand, folglich virtuell ist. Messungen an der optischen Bank ergeben folgende Beziehungen:

Befindet sich ein Gegenstand auf der einen Seite einer Linse

so ist sein Bild

ausserhalb der doppelten Brennweite,

verkehrt, verkleinert, auf der anderen Seite, also reell, zwischen einfacher und doppelter Brennweite;

in doppelter Brennweite,

verkehrt, gleich gross, reell, in doppelter Brennweite jenseits der Linse;

zwischen doppelter und einfacher Brennweite,

verkehrt, vergrössert, reell, ausserhalb der doppelten Brennweite jenseits der Linse;

in der Brennweite,

unendlich gross, unendlich fern, d. h. es entsteht kein Bild.

innerhalb der Brennweite,

aufrecht stehend, vergrössert auf derselben Seite wie der Gegenstand, also virtuell.

Zwischen der Entfernung a des Gegenstandes von einer bikonvexen Linse, der Entfernung b des Bildes von der Linse und ihrer Brennweite f besteht wie beim Hohlspiegel (näherungsweise) die Gleichung

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

wobei b für virtuelle Bilder negativ ist.

Gegenstand und Bild lassen sich also auch hier vertauschen.

Die Grösse des Bildes verhält sich zu der des Gegenstandes wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

Bemerkung. Diese Gesetze, welche gleichbedeutend mit denen für den Hohlspiegel sind, ergeben sich aus den obigen (88). Ist A

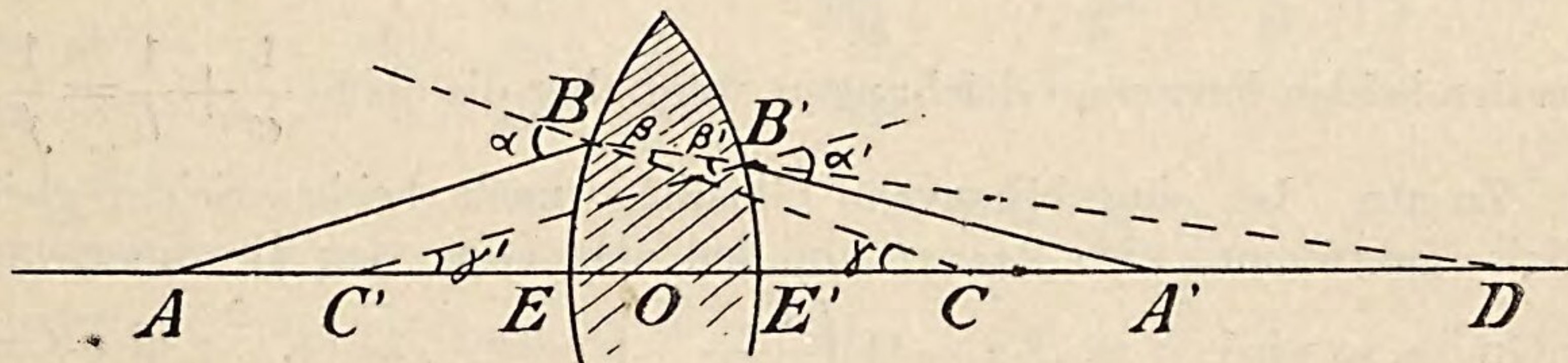


Fig. 74.

(Fig. 74) ein leuchtender Punkt der Hauptachse AO , so muss der Strahl AO ungebrochen durch die Linse hindurchgehen; denn die

Flächenteilchen, an welchen er an der Linse ein- und austritt, sind planparallel; irgend ein anderer Strahl wird sowohl bei seinem Eintritte in die Linse bei B als auch bei seinem Austritte aus derselben bei B' gebrochen und verlässt diese in der Richtung $B'A'$. Der Punkt A' der Hauptachse, in welcher sich diese beiden sowie alle von A auf die Linse fallenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch diese schneiden, ist das Bild von A . Ist nun C der Krümmungsmittelpunkt der vorderen Begrenzungsfläche der Linse und bildet der Strahl AB an dieser mit dem Einfallslote CB die Winkel α, β , so würde er, falls er das Medium, aus dem die Linse besteht, nicht mehr verliesse, in der Richtung BD so gebrochen, dass $\sin \alpha : \sin \beta = n$, wenn n den Brechungsexponenten bezeichnet. Setzt man nun $\sphericalangle ACB = \gamma$, $BC = r$, $AE = a$, $DE = d$, so ist, falls B sehr nahe bei E liegt, auch nahezu $AB = a$ und $DB = d$ und demnach

$$\sin \alpha : \sin \gamma = (a + r) : a \text{ (im Dreiecke } ABC) \text{ und} \\ \sin \gamma : \sin \beta = d : (d - r) \text{ (im Dreiecke } DBC).$$

Aus diesen drei Gleichungen folgt

$$(a + r)d : (d - r)a = n \text{ oder } \frac{1}{a} + \frac{n}{d} = (n - 1) \frac{1}{r} \quad (\text{I}).$$

Ist aber C' der Krümmungsmittelpunkt für die hintere Begrenzungsfläche der Linse, und bildet der zum zweiten Male gebrochene Strahl $B'A'$ mit dem Einfallslote $C'B'$ die Winkel β', α' , setzt man ferner $\sphericalangle A'C'B' = \gamma'$, $C'B' = r'$, $A'E' = b$, $DE' = d'$, also auch $A'B' = b$ und $DB' = d'$, so ist $\sin \alpha' : \sin \beta' = n$; dann

$$\sin \alpha' : \sin \gamma' = (b + r') : b \text{ (im Dreiecke } A'B'C') \text{ und} \\ \sin \gamma' : \sin \beta' = d' : (d' + r') \text{ (im Dreiecke } DB'C'); \text{ daher}$$

$$(b + r')d' : (d' + r')b = n \text{ oder } \frac{1}{b} - \frac{n}{d'} = (n - 1) \frac{1}{r'} \quad (\text{II}).$$

Bei Linsen von sehr geringer Dicke kann man nun $d' = d$ setzen; dann ergibt sich aber durch Addition von I und II

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = (n - 1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right).$$

Diese Gleichung gilt für jeden leuchtenden Punkt der Hauptachse, also auch für ihre Brennpunkte; für diese ist aber $a = f$ und $b = \infty$ und demnach ist auch $\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$.

Aus den beiden letzteren Gleichungen, folgt aber die obige $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$.

Zusatz. Ist eine bikonvexe Glaslinse nach beiden Seiten gleichmässig gekrümmt, also $r = r'$ und hat das Glas den Brechungsexponenten $3/2$, so wird $\frac{1}{f} = (3/2 - 1) \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r} \right)$ oder $\frac{1}{f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{r}$; also $f = r$. Für solche Linsen ist also die Brennweite dem Krümmungsradius gleich.

Von den Strahlen, die irgend ein nicht auf der Hauptachse liegender Punkt B des leuchtenden Gegenstandes AB (Fig. 75 a) auf

die Linse wirft, geht einer durch den optischen Mittelpunkt O der Linse; dieser wird nicht gebrochen, weil er an planparallelen Flächenstücken der Linse ein- und austritt; der Strahl BD , welcher parallel der Hauptachse auf die Linse fällt, wird aber durch den Brennpunkt

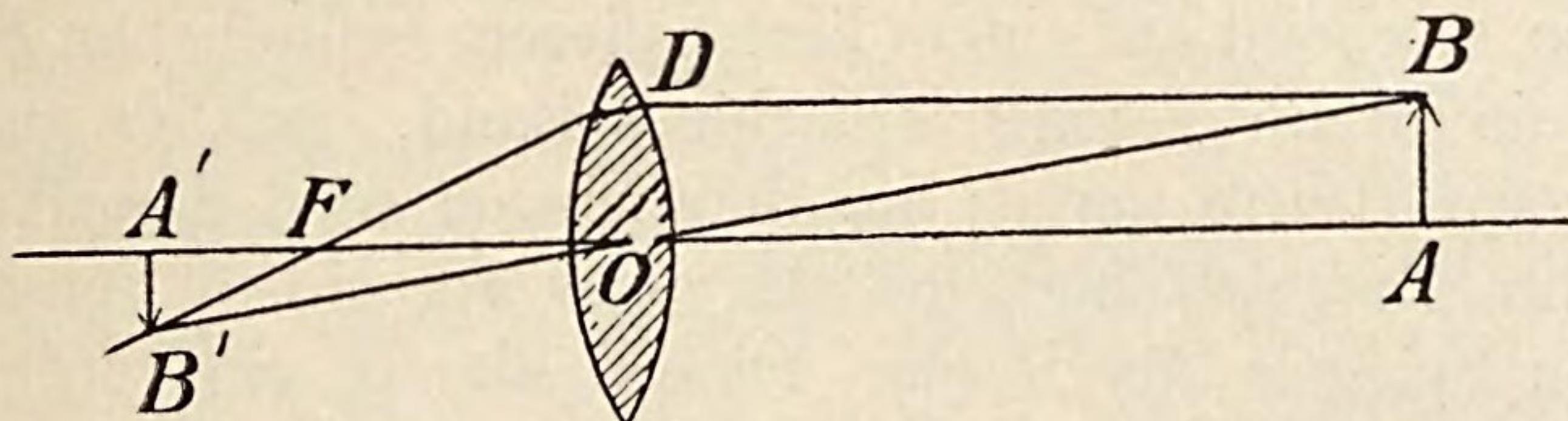


Fig. 75 a.

hinter der Linse gebrochen; der Schnittpunkt B' von BO und DF ist also das Bild von B , $A'B'$ das des Gegenstandes AB . Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke $A'OB'$ und AOB folgt aber, dass $A'B' : AB = A'O : AO$ ist.

b) Bikonkave Linsen.

Sonnenstrahlen, welche auf eine bikonkave Linse fallen, bilden vor der Linse einen Kegel, dessen Spitze aber hinter der Linse liegt, also virtuell ist; solche Linsen heissen daher Zerstreuungslinsen. Sind die einfallenden Strahlen parallel zur Hauptachse, so liegt die Spitze des Lichtkegels auch auf dieser und heisst dann ebenfalls Brennpunkt der Linse.

Strahlen, welche parallel zur Hauptachse einer bikonkaven Linse auffallen, werden von dieser so gebrochen, als ob sie aus dem hinter der Linse liegenden Brennpunkte kämen.

Das Bild eines vor einer bikonkaven Linse stehenden Gegenstandes ist stets mit diesem auf gleicher Seite der Linse, also virtuell, aufrechtstehend, verkleinert und liegt innerhalb der Brennweite (Fig. 75 b).

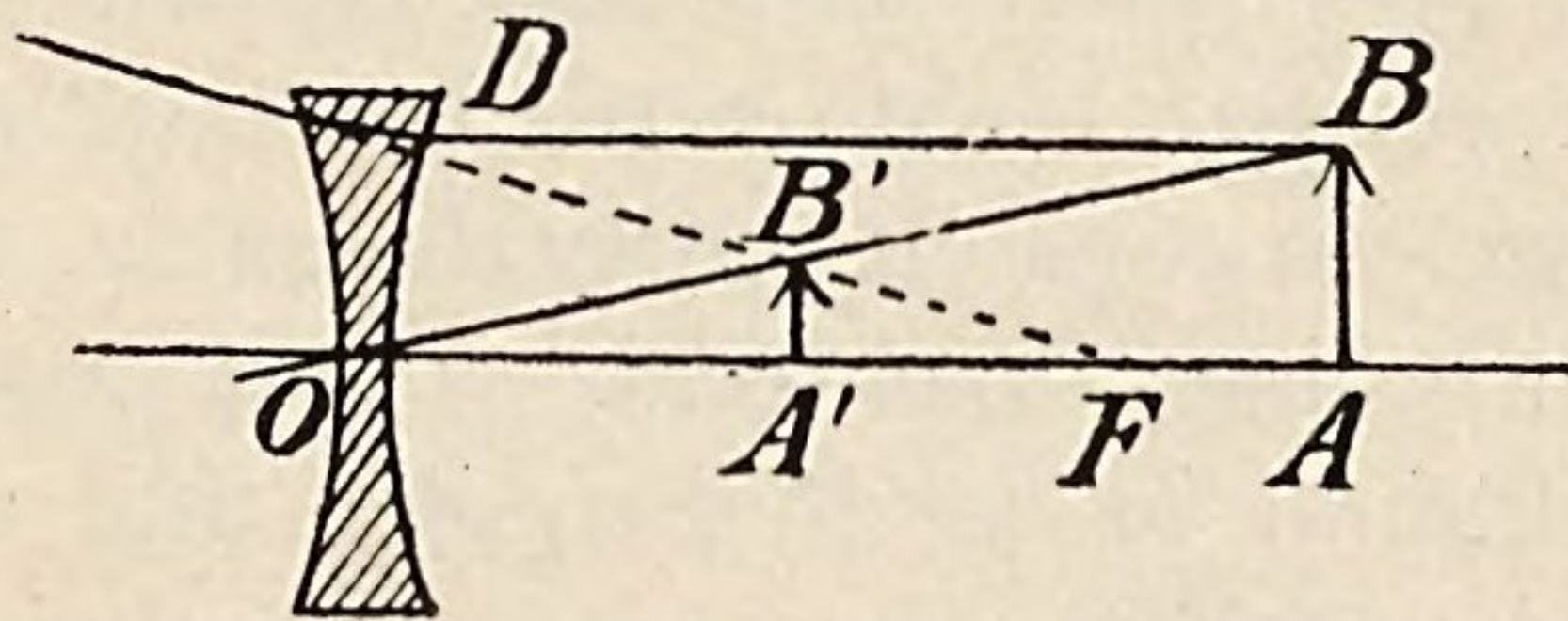


Fig. 75 b.

Die Gleichung $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ gilt auch für bikonkave Linsen, aber b und f sind stets negativ.

D. Farbenzerstreuung des Lichtes. (Dispersion.)

91. Das Sonnenspektrum. Spektralanalyse.

Versuch. Lässt man Sonnenlicht auf ein optisches Prisma fallen, so erscheint auf einem hinter diesem befindlichen Schirme ein in die Breite gezogenes farbiges Band, welches man das Sonnenspektrum nennt; am deutlichsten wird dasselbe sichtbar, wenn Sonnenstrahlen mittelst eines vor einem Fenster aufgestellten Spiegels durch eine feine Spalte in ein verdunkeltes Zimmer gelenkt werden und hier auf ein Prisma treffen.

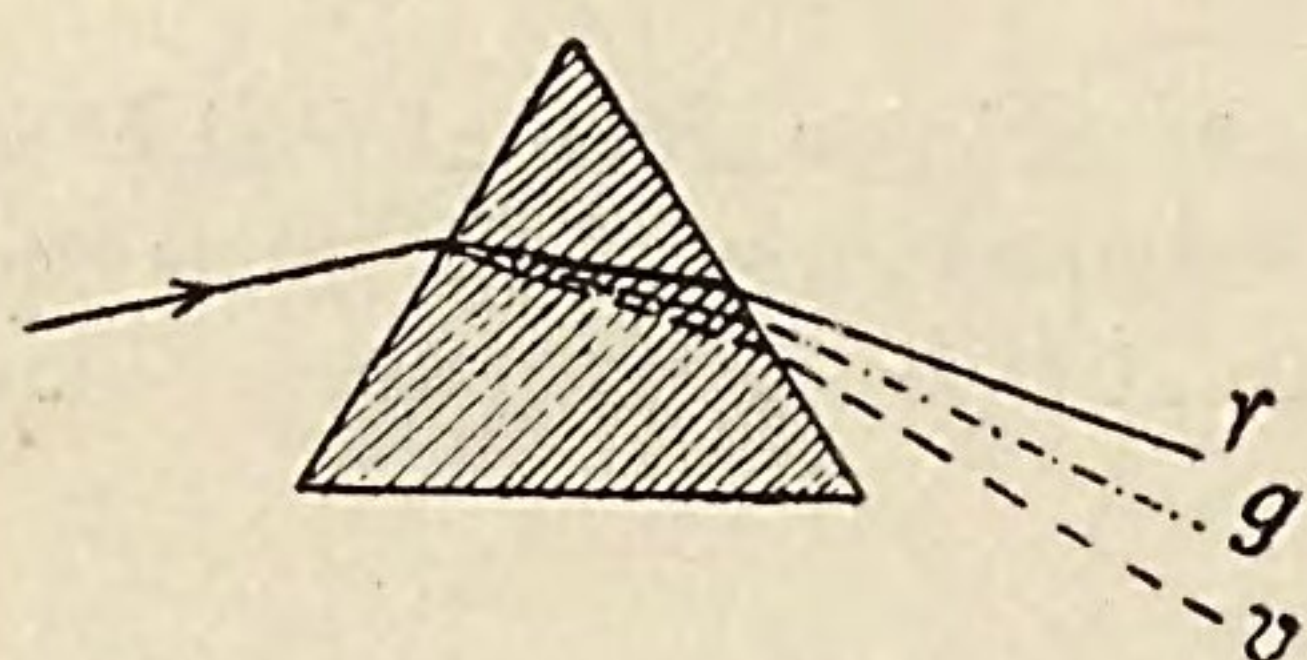


Fig. 76.

Das Spektrum enthält alle möglichen Farben; man teilt diese gewöhnlich in die Hauptgruppen rot, orange, gelb, grün, blau, indigo, violett, die aber nicht von gleicher Breite sind. Von der Richtung, in welcher das Sonnenlicht auf ein Prisma fällt, sind die roten Strahlen am wenigsten, alle folgenden mehr, die violetten am meisten abgelenkt. (Fig. 76.)

Bringt man in dem Schirme, auf welchem das Spektrum aufgefangen wird, eine feine Öffnung an, durch welche nur ein schmales Bündel farbiger Strahlen dringen kann und lässt dieses auf ein zweites Prisma fallen, so werden die farbigen Strahlen zwar noch einmal abgelenkt aber nicht in neue Farben zerlegt.

Lässt man die durch ein Prisma erzeugten Farbstrahlen des Sonnenlichtes auf ein zweites Prisma fallen, das die Strahlen im verkehrten Sinne ablenkt wie das erste, so werden sie wieder zu weissem Lichte vereinigt. Fällt das Spektrum auf eine Sammellinse, so entsteht hinter dieser da, wo die Strahlen sich schneiden, ein weisses Lichtbild. Trägt man auf einem Kreise farbige Sektoren in der Reihenfolge und ungefähren Breite der Spektralfarben auf, so erscheint dieser bei rascher Drehung unrein weiss.

Sonnenlicht besteht also aus farbigen Strahlen von ungleicher Brechbarkeit; die einzelnen farbigen Strahlen lassen sich nicht weiter zerlegen. Vereint geben die Spektralfarben wieder weisses Licht.

Das Sonnenspektrum enthält übrigens ausser den sichtbaren Strahlen auch noch andere; jenseits der roten Strahlen lassen sich Wärmestrahlen nachweisen, jenseits der violetten solche,

welche gewisse Substanzen chemisch zersetzen. (Photographie.) Ausserdem zeigen sich in demselben an bestimmten Stellen schmale, dunkle Streifen, die sog. Fraunhoferschen Linien.

Fallen Lichtstrahlen von einem glühenden Körper auf ein Prisma, so entsteht ein Spektrum, in welchem eine grössere oder geringere Anzahl der Farben des Sonnenspektrums fehlt; das Spektrum fester glühender Körper ist ein zusammenhängendes Band, das glühender Gase enthält nur einzelne farbige Linien. Das Spektrum eines glühenden Körpers hängt nur von dem Stoffe ab, aus dem er besteht; deshalb lässt sich umgekehrt aus dem Spektrum eines Körpers ein Schluss auf seine chemische Zusammensetzung ziehen. (Spektralanalyse.)

92. Komplementärfarben. Achromasie. Der Regenbogen. Farben der Körper.

Versuch. Schiebt man in das Strahlenbündel eines Sonnenspektrums von der Seite her ein zweites Prisma mit einem kleinen brechenden Winkel, so wird der Teil der Strahlen, welcher auf dieses Prisma fällt, noch einmal abgelenkt, so dass das Spektrum auf einem Schirme in zwei Teile zerlegt erscheint; je nach der Stellung des zweiten Prismas erscheint der eine Teil vorwiegend rot, der andere grün, oder der eine orange, der andere blau, der eine gelb, der andere violett.

Solche Farbenpaare, welche sich zu weiss ergänzen, nennt man Komplementärfarben.

Infolge der ungleichen Brechbarkeit der Lichtstrahlen erscheint jeder leuchtende Gegenstand, welchen man durch ein einfaches Prisma betrachtet, an seinen Rändern von einem farbigen Saume umgeben. Um diesen zu vermeiden, bringt man hinter dem Prisma ein zweites, entgegengesetzt brechendes Prisma (Fig. 77) aus einem Stoffe an, der zwar die gleiche Farbenzerstreuung, aber eine geringere Brechung der Strahlen erzeugt; gewöhnlich ist das erste Prisma aus Crown Glas, das zweite aus Flintglas und von kleinerem Brechungswinkel wie jenes. Ebenso lassen sich die farbigen Randstrahlen einfacher Sammellinsen durch Verbindung derselben mit passend gewählten Zerstreuungslinsen entfernen.

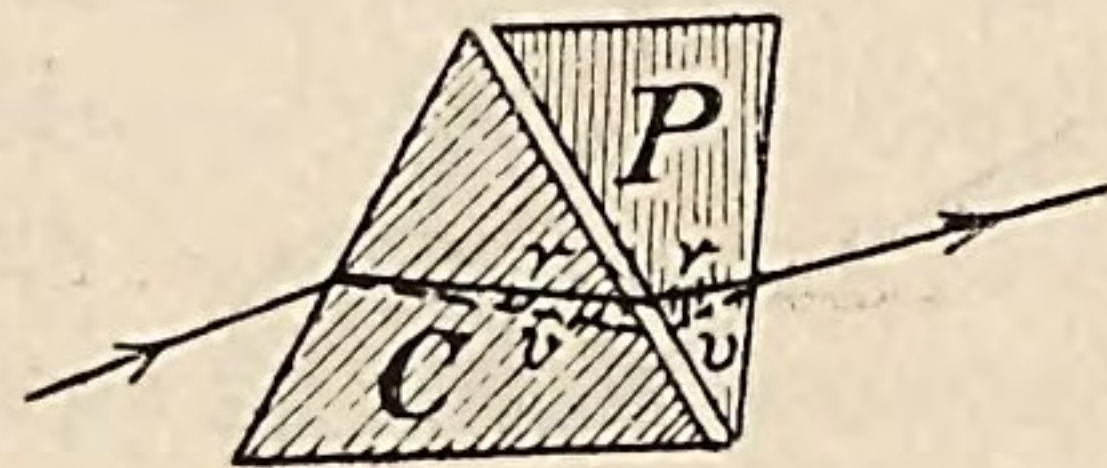


Fig. 77.

Prismen- oder Linsenzusammenstellungen, bei welchen die farbigen Randstrahlen vermieden sind, heissen *achromatisch*.

Eine Folge der mit jeder Lichtbrechung verbundenen Farbenzerstreuung ist auch der Regenbogen. Ein Sonnenstrahl SB (Fig. 78), welcher auf einen Regentropfen trifft, wird bei seinem

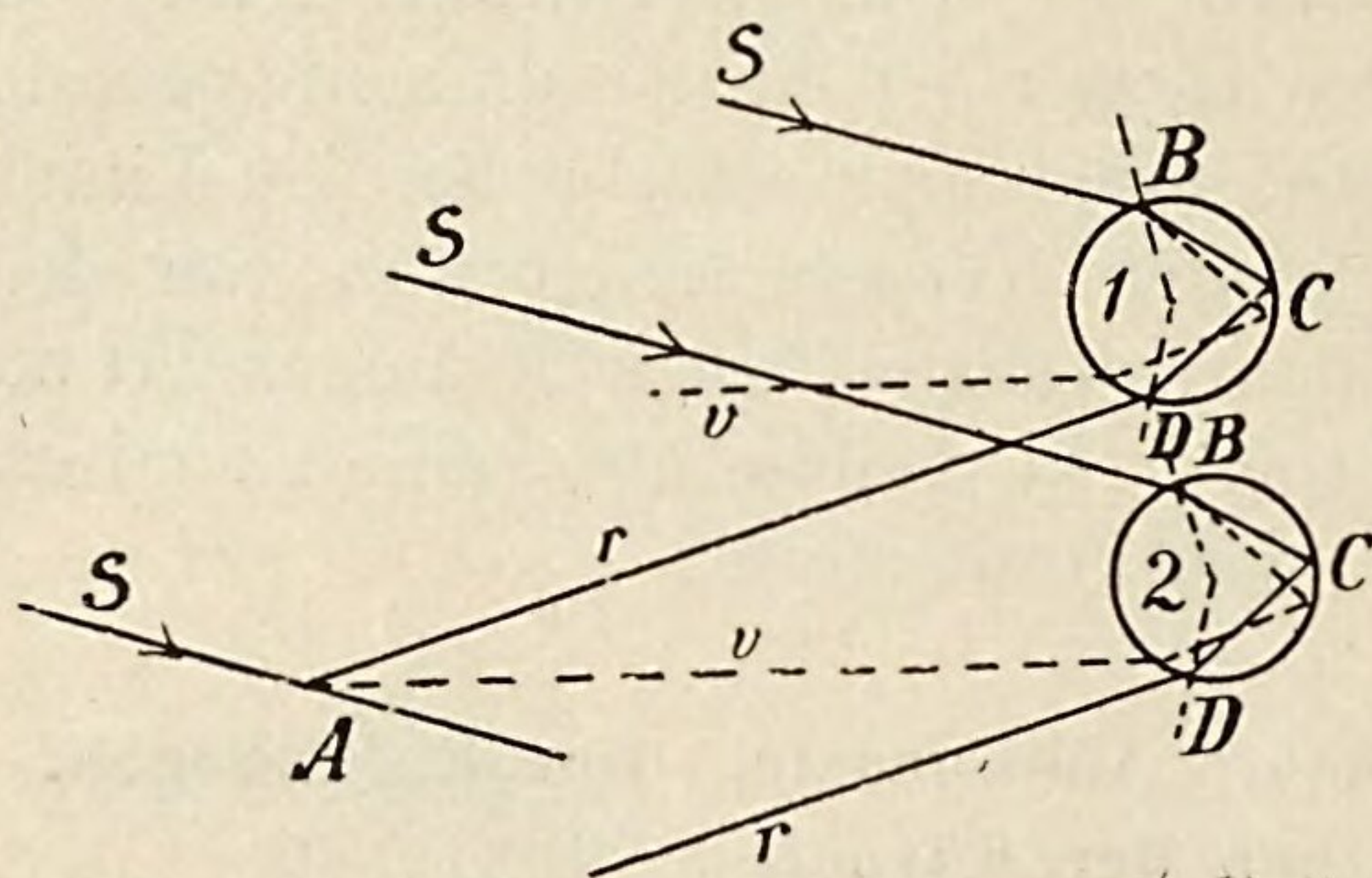


Fig. 78.

Eintritte bei B in denselben gebrochen und in Farben zerlegt, an der Innenwand C des Tropfens reflektiert und bei seinem Austritte bei D aus demselben zum zweiten Male gebrochen. Das Sonnenstrahlenbündel, welches auf einen Regentropfen

fällt, kommt also aus demselben reflektiert und im allgemeinen nach allen Richtungen in Farben zerstreut heraus; ein solcher Tropfen erscheint also dem Auge farblos. Bei einem bestimmten Einfallswinkel (rund 60°) treten aber von allen auf den Tropfen fallenden Strahlen die gleichfarbigen nahezu parallel heraus; dann erscheint also der Tropfen in einer bestimmten Farbe. Sieht aber das Auge in A den Tropfen 1 im roten Lichte, so müssen ihm tiefer liegende Tropfen wie z. B. 2 wegen der grösseren Brechbarkeit der folgenden Farben orange, gelb u. s. w. bis zu violett erscheinen; und da alle Strahlen, welche mit der durch das Auge zu den Sonnenstrahlen Parallelen gleiche Winkel bilden, in diesem den gleichen Eindruck erzeugen, so sieht es auf der der Sonne gegenüberliegenden Seite des Himmels ein kreisförmiges, farbiges Band, das oben rot, unten violett ist.

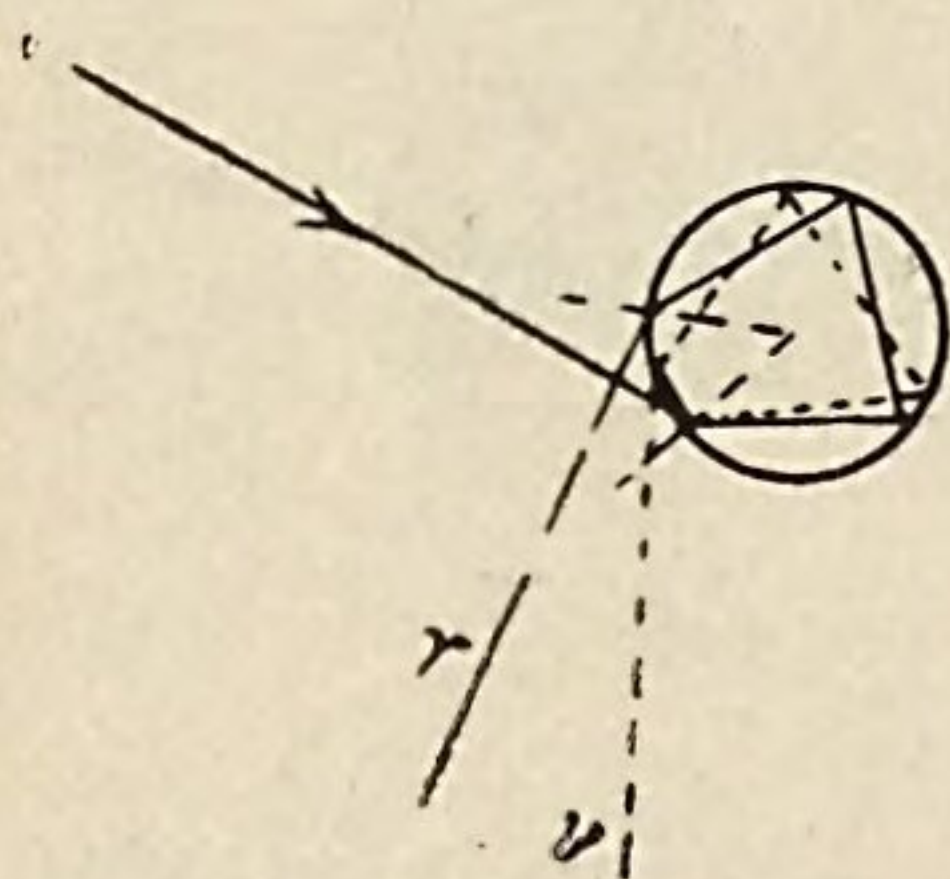


Fig. 79.

Ein roter Strahl bildet mit der Richtung AS der Sonnenstrahlen einen Winkel von rund $42^\circ 30'$, ein violetter einen solchen von rund 41° . Steht daher die Sonne im Horizonte, so bildet der Regenbogen einen Halbkreis; der Regenbogen ist um so kleiner, je höher die Sonne steht und ist nicht mehr wahrzunehmen, wenn die Sonnenhöhe $42^\circ 30'$ beträgt.

Ein Sonnenstrahlenbündel kann aber in den Regentropfen auch zweimal reflektiert werden (Fig. 79); dann entsteht ein zweiter, etwas schwächerer Regenbogen von umgekehrter Reihenfolge der Farben; sein Violett erscheint unter einem Winkel von 53° , sein Rot unter 50° gegen die Richtung der Sonnenstrahlen.

Lichtstrahlen, welche auf einen Körper fallen, können an seiner Oberfläche reflektiert, im Inneren des Körpers zurückgehalten (absorbiert) oder von ihm durchgelassen werden. Ein undurchsichtiger Körper hat die Farbe, welche die von ihm reflektierten Lichtstrahlen besitzen; zerstreut er sämtliche Lichtstrahlen nach allen Seiten, so heisst er weiss; absorbiert er alle Strahlen, so nennt man ihn schwarz. Ein durchsichtiger Körper erscheint in der Farbe der von ihm durchgelassenen Strahlen; er ist farblos, wenn Strahlen aller Farben durch ihn hindurchgehen.

E. Das Auge und die optischen Instrumente.

93. Das Auge.

Das Auge ist ein von einer undurchsichtigen, harten Haut umschlossener, mit einer durchsichtigen, zähflüssigen Masse, dem Glaskörper, ausgefüllter, kugelförmiger Körper; nur vorne ist die harte Haut durchsichtig und etwas nach aussen gewölbt; an dieser Stelle befindet sich in dem feinen Häutchen, welches die harte Haut innen bedeckt eine kleine Öffnung, die Pupille, durch welche das Licht in das Innere des Auges gelangt, und hinter dieser die bikonvexe Krystalllinse, welche von den vor dem Auge befindlichen Gegenständen auf der an seiner Innenwand befindlichen Netzhaut verkehrte, verkleinerte, reelle Bilder erzeugt. Die für Lichtstrahlen empfindlichste Stelle ist der der Pupille gegenüberliegende gelbe Fleck; dagegen werden Lichtstrahlen, welche auf die Ansatzstelle des Sehnerven, den blinden Fleck, fallen, nicht wahrgenommen.

Von der Existenz des blinden Fleckes kann man sich dadurch überzeugen, dass man ein Auge schliesst, mit dem anderen aber einen bestimmten Punkt einer dunklen Fläche fixiert, neben welcher sich in einer Entfernung von etwa 10 cm ein kleiner, weisser Kreis befindet; nähert man die Fläche dem Auge bis zu einer bestimmten Entfernung, so sieht es den Kreis nicht mehr.

Die Grösse, welche ein Gegenstand dem Auge zu haben scheint, hängt von dem Gesichtswinkel, d. h. von dem Winkel ab, welchen zwei von äussersten Punkten des Gegenstandes in das Auge fallende Strahlen bilden; die scheinbare Grösse eines Gegenstandes ist deshalb um so kleiner, je kleiner er ist und je weiter er von dem Auge entfernt ist. Gegenstände, deren Gesichtswinkel weniger als etwa $30''$ beträgt, kann das Auge nicht mehr wahrnehmen. Die deutliche Sehweite eines Auges, d. h. die Entfernung, in welcher sich Gegenstände vor dem Auge befinden müssen, um scharf wahrgenommen zu werden, beträgt durchschnittlich 25 cm.

Mit beiden Augen sieht man einen Gegenstand nur dann einfach, wenn die von ihm ausgehenden Lichtstrahlen in beiden Augen auf den gelben Fleck oder wenigstens auf zwei Stellen

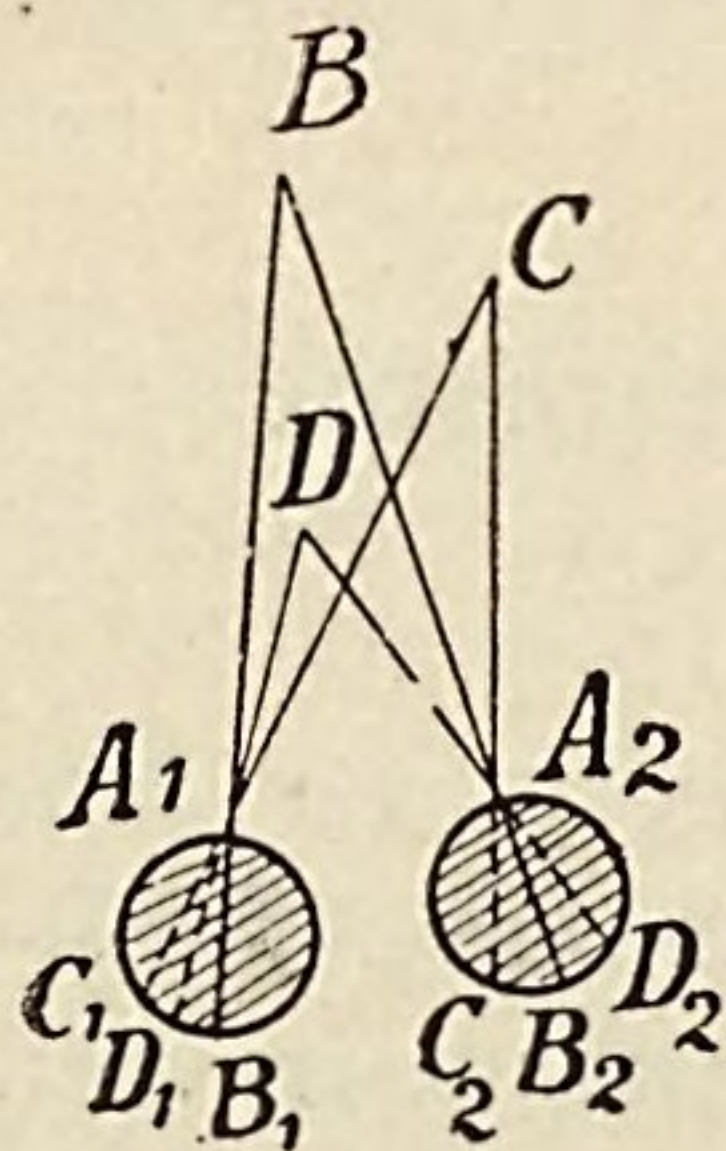


Fig. 80.

fallen, welche in beiden Augen links oder in beiden rechts vom gelben Flecke liegen. Dagegen werden Gegenstände doppelt gesehen, deren Bilder in beiden Augen auf entgegengesetzten Seiten des gelben Fleckes liegen. Ist B_1 (Fig. 80) der gelbe Fleck des Auges A_1 , B_2 der von A_2 , so werden die Gegenstände B und C einfach, D aber doppelt gesehen. Doppelbilder nimmt man wahr, wenn man den vor die Augen gehaltenen Finger scharf fixiert und gleichzeitig einen Gegenstand beobachtet, der vom Auge weiter entfernt ist als der Finger.

Die auf der Netzhaut entstehenden Bilder haben nur zwei Dimensionen; der Eindruck des Körperlichen kommt aber dadurch zu stande, dass das eine Auge einen Gegenstand von einer etwas anderen Seite sieht als das andere Auge.

Macht man von einem Gegenstande zwei photographische, seitliche Aufnahmen ungefähr so wie sie die beiden Augen wahrnehmen würden, und betrachtet diese gleichzeitig und zwar jede nur mit dem entsprechenden Auge, so glaubt man, nur ein Bild des Gegenstandes zu sehen, in welchem die Einzelheiten körperlich hervortreten. Die Wirkung wird erhöht, wenn sich zwischen den Augen eine Scheidewand befindet und wenn die beiden Aufnahmen durch Linsen betrachtet werden, welche die Bilder scheinbar an einer Stelle zur Deckung bringen. (Stereoskop.)

Die Entfernung der Krystalllinse von dem Hintergrunde des Auges ist eine unveränderliche Grösse, also die Bildweite der Linse

für alle Gegenstandsweiten die gleiche; die Krystalllinse hat aber die Fähigkeit der Akkommodation, d. h. sie kann sich stärker krümmen, um von naheliegenden, schwächer, um von entfernteren Gegenständen auf der Netzhaut deutliche Bilder zu erzeugen.

Jeder Lichteindruck dauert im Auge eine, wenn auch sehr kurze Zeit fort; Lichteindrücke, welche das Auge rasch nach einander erhält, erscheinen ihm daher gleichzeitig zu bestehen. Beispielsweise erzeugt eine schnell rotierende Flamme den Eindruck eines leuchtenden Kreises.

In manchem Auge schneiden sich die von einem leuchtenden Punkte auf die Linse fallenden Strahlen nicht auf der Netzhaut, sondern schon etwas vor oder hinter derselben; ein solches Auge sieht also die Gegenstände nicht deutlich, weil ihre scharfen Bilder nicht auf der Netzhaut entstehen. Um nun diese Bilder auf die Netzhaut zu verschieben, also ein deutliches Sehen der Gegenstände zu ermöglichen, bringt man vor dem Auge eine Linse (Brille) an; bei kurzsichtigen Augen, d. h. bei solchen, in welchen die Bilder der Gegenstände vor der Netzhaut entstehen, müssen die einfallenden Lichtstrahlen durch Konkavlinsen zerstreut werden; vor weitsichtige Augen, bei denen die Bilder erst hinter der Netzhaut entstehen, setzt man Sammel- also Konvexlinsen.

94. Die Camera obscura. Das Skioptikon. Das Sonnenmikroskop.

Die Camera obscura ist ein allseitig geschlossenes Gehäuse, in dessen vordere Wand eine bikonvexe Linse eingesetzt ist; während die dieser gegenüberliegende Hinterwand gewöhnlich eine Milchglastafel bildet. Die Linse erzeugt von einem ausserhalb des Apparates jenseits ihres Brennpunktes befindlichen Gegenstande auf der Glastafel ein verkehrtes, reelles Bild, dessen Grösse sich zu der des Gegenstandes verhält wie die Bildweite zur Gegenstandsweite (90 a). Um die Bilder in der richtigen Entfernung von der Linse auffangen zu können, ist entweder die Linse oder die Glastafel verschiebbar. Beim photographischen Apparate wird die Milchglastafel nach der richtigen Einstellung der Linse durch eine lichtempfindliche Platte ersetzt.

damit die Sonnenstrahlen mittelst eines vor einem Fenster aufgestellten Spiegels auf die Linsen geleitet werden können.

95. Die Lupe. Das zusammengesetzte Mikroskop.

Lupe oder Vergrößerungsglas nennt man eine bikonvexe Linse dann, wenn sie von einem Gegenstande ein virtuelles, aufrecht stehendes, vergrössertes Bild erzeugt, wenn sich also der Gegenstand innerhalb ihrer Brennweite befindet (90 a). Soll das Bild scharf erscheinen, so muss die Linse dicht vor das Auge gehalten und der Gegenstand von ihr so weit entfernt sein, dass sein Bild in der deutlichen Sehweite des Auges (93) entsteht.

Unter der Vergrößerung einer Lupe versteht man den Quotienten aus der scheinbaren Grösse des Bildes in der Lupe durch die Grösse, in welcher der Gegenstand dem freien Auge in deutlicher Sehweite erschiene; die hier in Betracht kommenden Winkel sind aber stets so klein, dass man statt derselben ihre Tangenten setzen kann; ist also AB (Fig. 83) der Gegenstand in der Entfernung e von der Lupe, $A'B'$ sein Bild in deutlicher Sehweite s und wäre ab die Stellung des Gegenstandes in dieser Entfernung s für das freie Auge, so ist die Vergrößerung $v = \tan A'OB' : \tan aOb$ oder näherungsweise $v = A'B' : ab = A'B' : AB = OC' : OC = s : e$, oder da für eine Linse von der Brennweite f (nach 90) $\frac{1}{e} = \frac{1}{f} + \frac{1}{s}$ ist, so ist $v = \frac{s}{f} + 1$, wobei s rund 25 cm beträgt. Die Vergrößerung ist daher um so bedeutender, je kleiner die Brennweite, je grösser also die Krümmung der Linse ist.

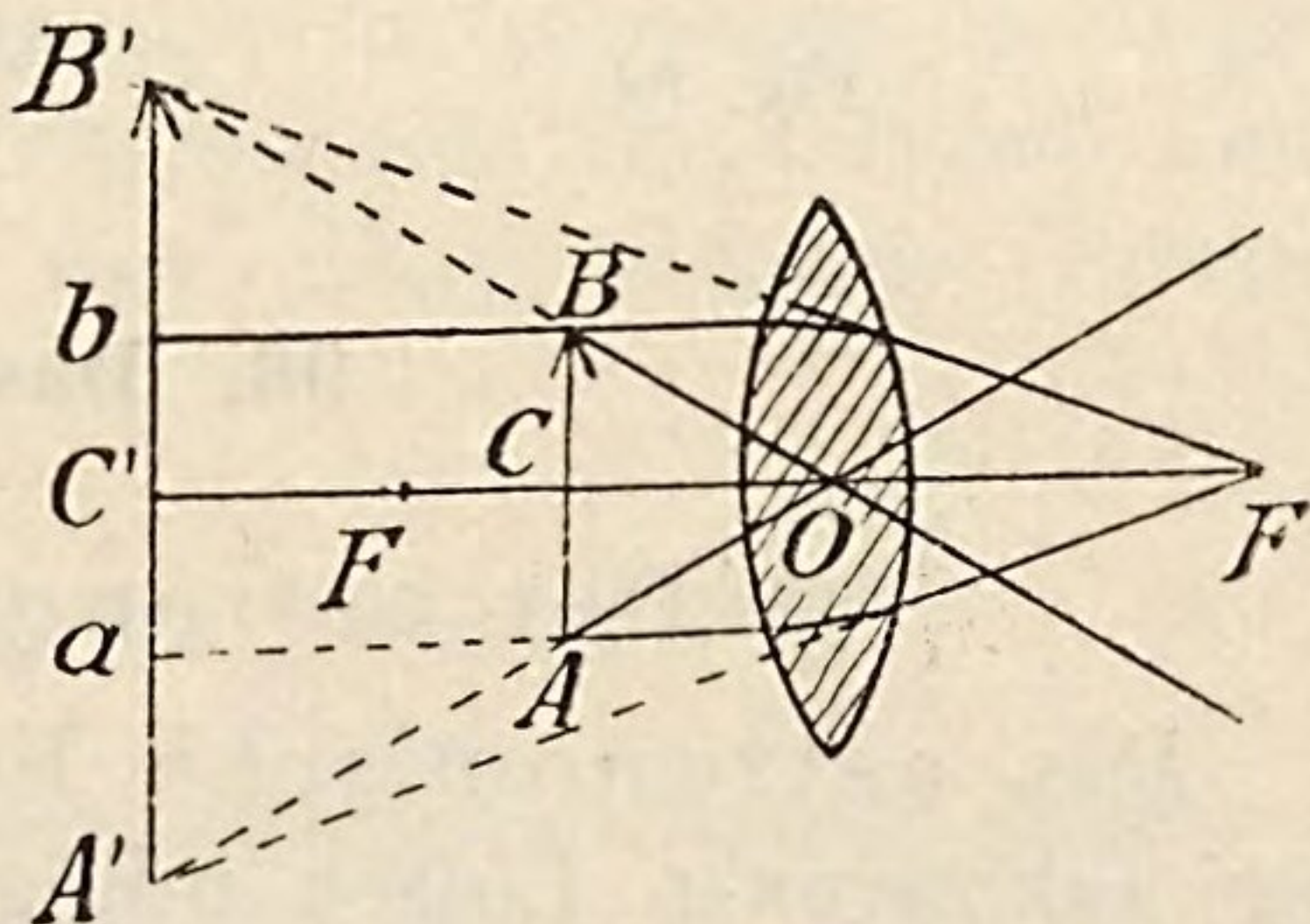


Fig. 83.

Um deutliche Bilder ohne Randfarben (92) zu erhalten, wendet man häufig statt einer Linse zwei oder mehrere hinter einander stehende Linsen von passender Brennweite an.

Das zusammengesetzte Mikroskop besteht aus zwei bikonvexen Linsen mit gemeinsamer Achse; die dem zu betrachtenden Gegenstande zugewandte Linse, das sogenannte Objektiv O (Fig. 84), ist stark gekrümmt und erzeugt infolgedessen von einem nahe am Brennpunkt aber ausserhalb desselben befindlichen Gegenstande AB ein bedeutend vergrössertes, verkehrtes, reelles Bild $A'B'$; die zweite vor dem Auge befindliche Linse O' ,

das Okular, dient als Lupe; sie erzeugt von dem Bilde $A'B'$ ein zweites, wiederum vergrößertes, aber virtuelles Bild $A''B''$ von gleicher Stellung, wie jenes. Die beiden Linsen müssen daher in solcher Entfernung von einander aufgestellt sein, dass das vom Objektiv erzeugte Bild innerhalb der Brennweite des Okulares entsteht und zwar in derjenigen Entfernung von diesem, für welche das Bild im Okulare in der deutlichen Sehweite des Auges erscheint. Die Bilder der Gegenstände erscheinen demnach beim zusammengesetzten Mikroskope verkehrt.

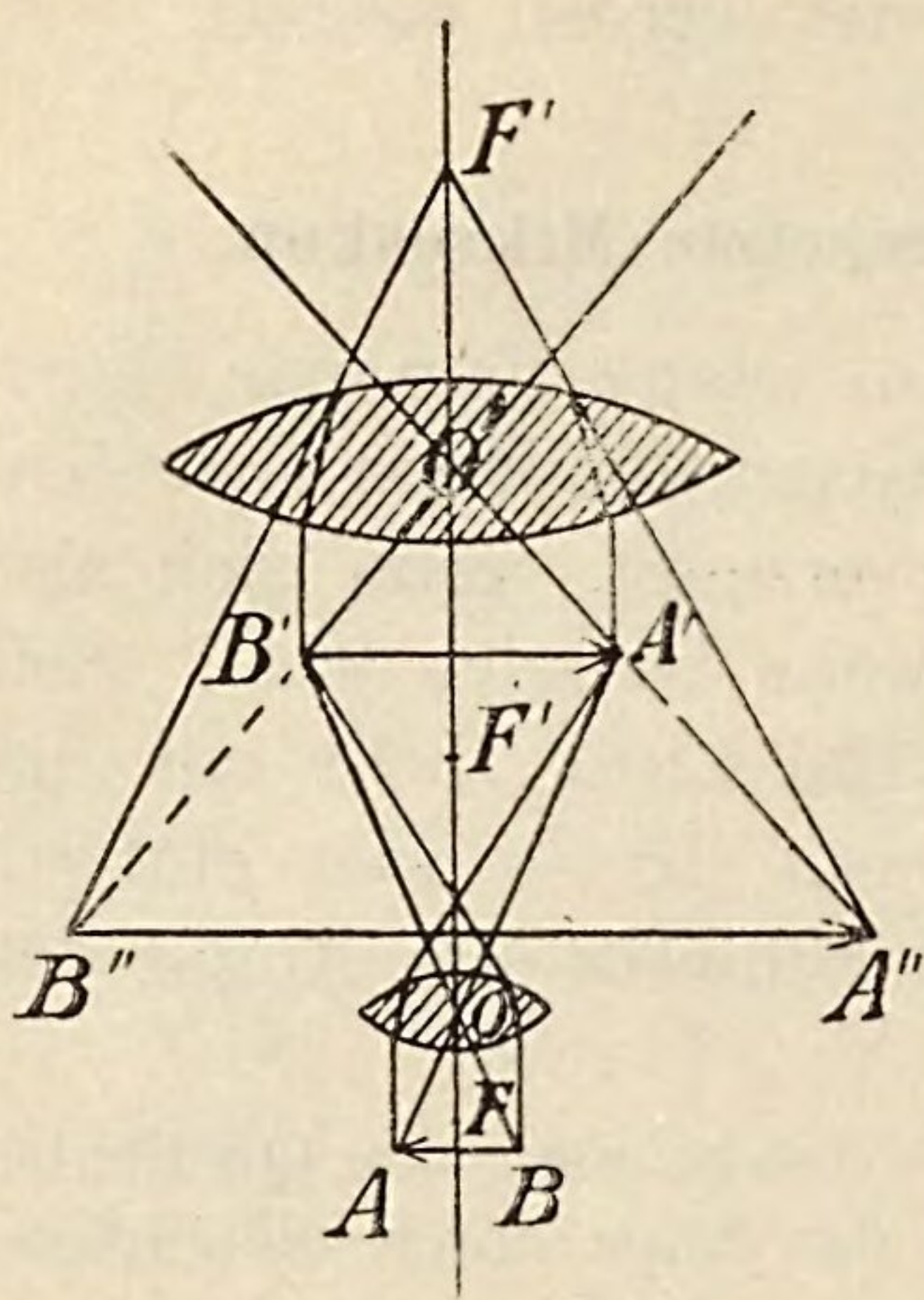


Fig. 84.

96. Das Fernrohr.

a) Das astronomische Fernrohr.

Das astronomische Fernrohr besteht ebenfalls aus zwei bikonvexen Linsen mit gemeinsamer Achse; die Objektivlinse O (Fig. 85) ist schwach gekrümmt und erzeugt von

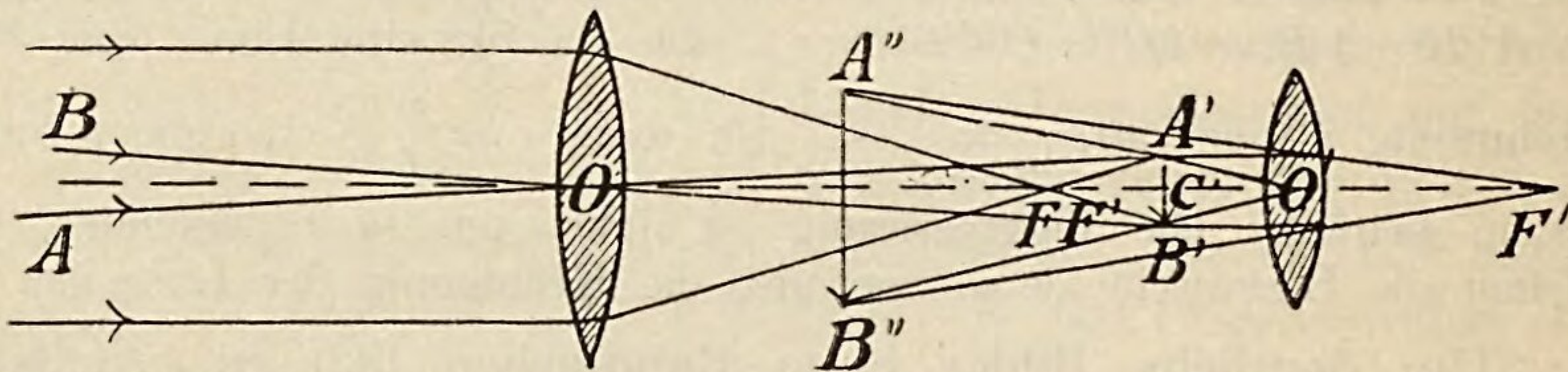


Fig. 85.

einem zu betrachtenden Gegenstande AB , da er um mehr als die doppelte Brennweite von ihr absteht, ein verkleinertes, verkehrtes, reelles Bild $A'B'$. Das Okular O' ist wie beim Mikroskope eine Lupe, erzeugt also von dem innerhalb seiner Brennweite entstehenden Objektivbilde $A'B'$ ein zweites, vergrößertes, virtuelles Bild $A''B''$ in gleicher Stellung. Die Bilder erscheinen also im astronomischen Fernrohre verkehrt.

Die Vergrößerung ist der Quotient aus der scheinbaren Grösse des Bildes $A''B''$ (Fig. 85) im Fernrohre durch die Grösse, in welcher der Gegenstand AB dem freien Auge erschiene, wenn dieses von ihm ebenso weit entfernt wäre wie das Fernrohr. Diese beiden Grössen, d. h. die Gesichtswinkel von Bild und Gegenstand, können aber, da sie stets sehr klein sind, durch ihre Tangenten ersetzt werden; und da die scheinbare Grösse des Gegenstandes für ein freies Auge dieselbe ist, mag es sich in der Entfernung des Okulares oder des Objectives vom Gegenstande befinden, so ist die Vergrößerung $v = \tan A''O'B'' : \tan AOB = \tan A'O'B' : \tan A'OB'$; oder näherungsweise $v = OC' : O'C'$. Das Objectivbild liegt aber so nahe an den Brennpunkten beider Linsen, dass man, wenn f die Brennweite des Objectives, f' die des Okulares ist, ohne grossen Fehler setzen kann

$$v = f : f'.$$

Das Bild eines unendlich fernen Gegenstandes, z. B. eines Sternes entsteht im Brennpunkte des Objectives, das eines endlich fernen Gegenstandes liegt jenseits des Brennpunktes und zwar um so weiter vom Objective entfernt, je näher der Gegenstand bei diesem ist (90); für naheliegende Gegenstände muss also das Fernrohr ausgezogen, für ferne stehende verkürzt werden.

b) Das terrestrische Fernrohr.

Um mittelst eines Fernrohres aufrechtstehende Bilder zu erhalten, bringt man zwischen dem Objective O (Fig. 86) und

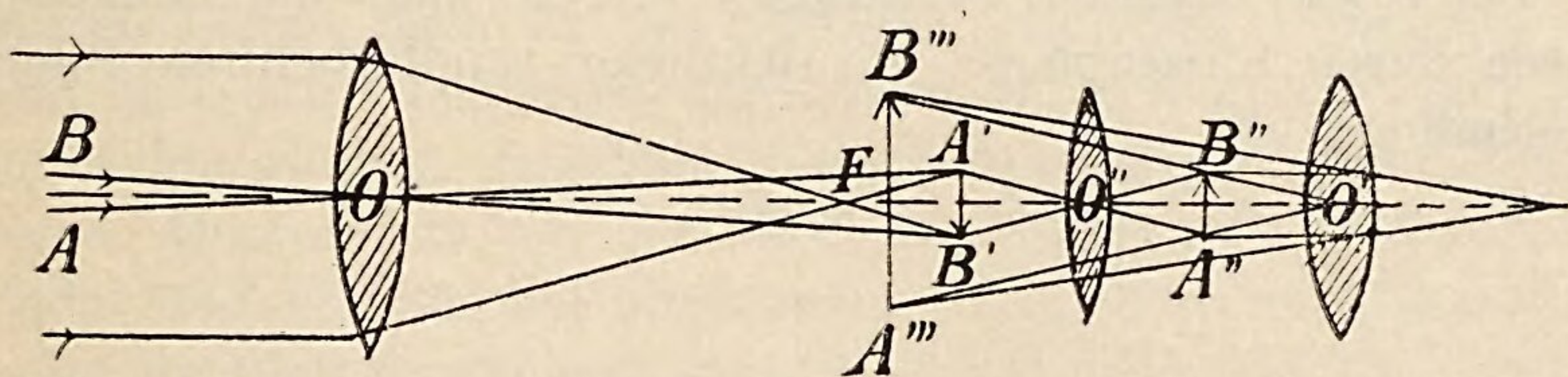


Fig. 86.

dem Okulare O' noch eine dritte Linse O'' an, welche mit jenen gleiche Achse hat und so gestellt ist, dass sie von dem durch das Objectiv hervorgerufenen Bilde $A'B'$ des Gegenstandes AB ein verkehrtes, also bezüglich des Gegenstandes aufrechtstehendes, gleich grosses Bild $A''B''$ erzeugt; das Okular liefert dann das subjektive, vergrösserte, aufrecht stehende Bild $A'''B'''$.

c) Das Galileische Fernrohr.

Aufrechtstehende Bilder von Gegenständen entstehen auch dadurch, dass man in das vom Objektiv ausgehende Strahlenbündel zwischen diesem und der Stelle, an welcher das reelle Objektivbild $A'B'$ (Fig. 87) entstehen würde, als Okular eine

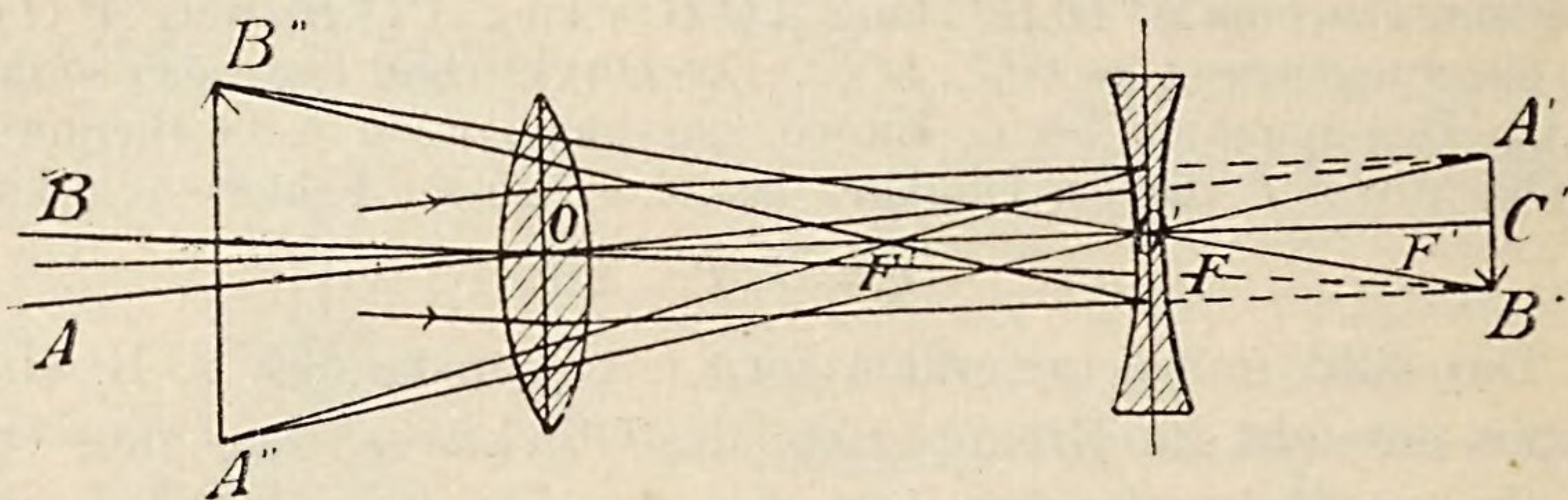


Fig. 87.

bikonkave Linse einschiebt; die Strahlen werden von dieser so zerstreut, dass hinter derselben ein aufrechtstehendes, virtuelles, vergrößertes Bild $A''B''$ erscheint. (Operngucker, Feldstecher.)

Die Vergrößerung ist wie beim astronomischen Fernrohre $v = \tan A''O'B'' : \tan AOB = \tan A'O'B' : \tan A'OB' = OC' : O'C'$ oder, da das Objektivbild sehr nahe am Brennpunkte beider Linsen entstehen würde $v = f : f'$, wenn f die Brennweite des Objektivs, f' die des Okulares bezeichnet.

Bei allen besseren Fernrohren ersetzt man die einfachen Linsen durch Linsenpaare, um deutliche, randfarbenfreie Bilder zu erhalten.

Siebenter Abschnitt.

Vom Magnetismus und von der Elektrizität.

A. Magnetismus.

97. Natürliche und künstliche Magnete. Magnetpole.

Es gibt ein Eisenerz, welches die Eigenschaft hat, Eisen- oder Stahlkörperchen aus kleinen Entfernungen an sich zu ziehen und dann festzuhalten; diese Eigenschaft nennt man Magnetismus und jenes Eisenerz einen natürlichen Magneten. Eisenstäbe lassen sich durch geeignetes Bestreichen mit künstlichen Magneten magnetisieren (98) und heissen dann künstliche Magnete. Beide Arten von Magneten besitzen erfahrungsgemäss die gleichen Eigenschaften.

Versuche. Legt man einen stabförmigen Magneten seiner ganzen Länge nach in ein Häufchen von Eisenfeilspänen und hebt ihn dann behutsam heraus, so bleibt rings um den Stab an beiden Hälften desselben je ein Büschel Eisenfeilicht hängen, dessen Querschnitt von der Mitte des Stabes aus zunimmt; am Ende sind die Büschel abgerundet. Legt man auf einen Magneten ein Blatt Papier und streut Eisenspäne darauf, so sammeln sich diese bei leichter Erschütterung des Papiere in krummen Linien, den sogenannten magnetischen Kraftlinien, an, welche in der Nähe der Stabenden am dichtesten beisammen liegen. Hängt man einen Magneten so auf, dass er sich um eine durch seinen Schwerpunkt gehende Achse horizontal frei bewegen kann, so stellt er sich in einer ganz bestimmten Richtung ein, die ungefähr der geographischen Nord-Südrichtung entspricht.

Ein jeder Magnet besitzt also zwei nahe an seinen Enden befindliche Stellen, an welchen sich der Magnetismus am stärksten äusserst; man nennt sie die Pole des Magneten und zwar

denjenigen, welcher bei freier Beweglichkeit des Magneten nach Norden zeigt, den Nordpol, den anderen den Südpol.

Nähert man dem Nordpole eines Magneten, der sich um eine durch seinen Schwerpunkt gehende Achse frei bewegen kann, den Nordpol eines anderen Magneten oder dem Südpole des einen den Südpol des anderen, so dreht sich der frei bewegliche Magnet vom anderen weg; bringt man dagegen dem Nordpole eines frei beweglichen Magneten den Südpol eines anderen nahe oder dem Südpole des ersteren den Nordpol des letzteren, so bewegt sich der frei schwingende Magnet zum anderen hin.

Gleiche Magnetpole stossen sich ab, entgegengesetzte Magnetpole ziehen sich an.

98. Magnetische Influenz. Herstellung künstlicher Magnete.

Hypothetische Erklärung des Magnetisierens.

Versuche. Nähert man dem einen Ende eines Stäbchens aus weichem Eisen einen Magnetpol oder bringt man es mit diesem in Berührung, so wird das Eisenstäbchen ebenfalls magnetisch; an den dem Magnetpole zugewandten Ende hat es den entgegengesetzten Pol, am abgewandten Ende den gleichnamigen. Wird das Eisenstäbchen vom Magnetpole entfernt, so ist es wieder unmagnetisch. Ein Stahlstäbchen muss längere Zeit mit einem Magnetpole in Berührung bleiben, um magnetisch zu werden, behält aber dann seinen Magnetismus bei, auch wenn es vom Magnetpole entfernt wird. Man sagt, das Eisen- oder Stahlstäbchen sei durch Influenz magnetisch geworden.

Um kräftige Magnete von dauernder Wirkung herzustellen, streicht man über einen Stahlstab seiner Länge nach mit einem natürlichen oder künstlichen Magneten unter gelindem Drucke hin und zwar zuerst mit dem einen Pole über die eine Hälfte des Stabes von seiner Mitte aus nach aussen, dann ebenso mit dem anderen Pole über die andere Stabhälfte. Die Stärke, bis zu welcher ein Stahlstab magnetisiert werden kann, hat eine bestimmte Grenze, die von der Stärke des ursprünglichen Magneten, sowie von der Grösse und Härte des Stahlstabes abhängt.

Als Einheit der Stärke eines Magnetpoles bezeichnet man diejenige, welche einen gleich starken, 1 cm entfernten Pol mit einer Kraft gleich 1 Dyne (76) abstösst.

Ein künstlicher Magnet wird Nadel-, Stab- oder Hufeisenmagnet genannt, je nachdem er gerade und an den Enden zugespitzt oder gerade und an allen Stellen gleich dick oder endlich hufeisenförmig gebogen ist.

Die Fähigkeit eines Magneten, Eisenstäbe festzuhalten, nennt man seine Tragkraft; ein Mass für dieselbe ist das Gewicht desjenigen Eisenstückes, welches der Magnet eben noch zu halten vermag. Ein Hufeisenmagnet, vor dessen Pole ein Stück Eisen, der sogenannte Anker, gelegt ist, hat eine grössere Tragkraft als zwei getrennte Magnetpole von gleich starkem Magnetismus, weil der Anker auf den Hufeisenmagneten durch Influenz magnetisierend zurück wirkt.

Versuch. Magnetisiert man eine stählerne Stricknadel und zerbricht sie dann in Stücke von beliebiger Grösse, so ist jedes Stück wieder ein vollständiger Magnet.

Dieser Versuch berechtigt zu der Annahme, dass jeder Magnet (Fig. 88) aus magnetischen Molekülen besteht, deren gleichnamige Pole sämtlich die gleiche Richtung haben.

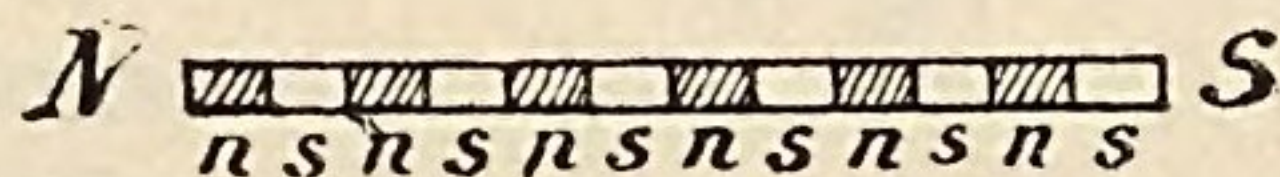


Fig. 88.

In der Mitte des Magneten heben sich die Wirkungen aller magnetischen Moleküle gegenseitig auf, sie ist also nach aussen hin unmagnetisch; gegen die Enden hin aber überwiegt die Wirkung der einen, gleichnamigen Magnetpole die der anderen; der nach aussen wirkende, sogenannte freie Magnetismus ist also an den Enden des Magneten am grössten. Unmagnetisch ist nach dieser Hypothese ein Stahl- oder Eisenstab so lange, als seine magnetischen Moleküle mit ihren Polen nach allen möglichen Richtungen gelagert sind; das Magnetisieren besteht dann darin, dass die gleichnamigen Pole der Moleküle durch das Bestreichen mit einem Magneten gleich gerichtet werden. Ist dies bei allen Molekülen der Fall, so hat der Magnetismus des Stabes seine Grenze erreicht.

99. Deklination. Astatistische Nadelpaare. Inklination. Erdmagnetismus.

Der Winkel, welchen die gerade Verbindungslinie der Pole einer in einer Horizontalebene frei beweglichen Magnetnadel mit der Ebene des geographischen Meridianes bildet, heisst magnetische Deklination.

Grösse und Richtung der Deklination sind an verschiedenen Orten der Erde verschieden und ändern sich am selben Orte

periodisch, aber sehr langsam; in unseren Gegenden ist der Nordpol einer Magnetnadel zur Zeit westlich abgelenkt, im Westen Deutschlands um rund 13° ; nach Osten hin wird die Deklination kleiner und beträgt an der Ostgrenze noch etwa 8° ; sie nimmt bei uns jährlich um etwa $0,13^\circ$ ab. Ein klares Bild über die Werte der magnetischen Deklination an der Erdoberfläche geben die Isogonen, Linien, welche die Orte mit gleicher Deklination verbinden.

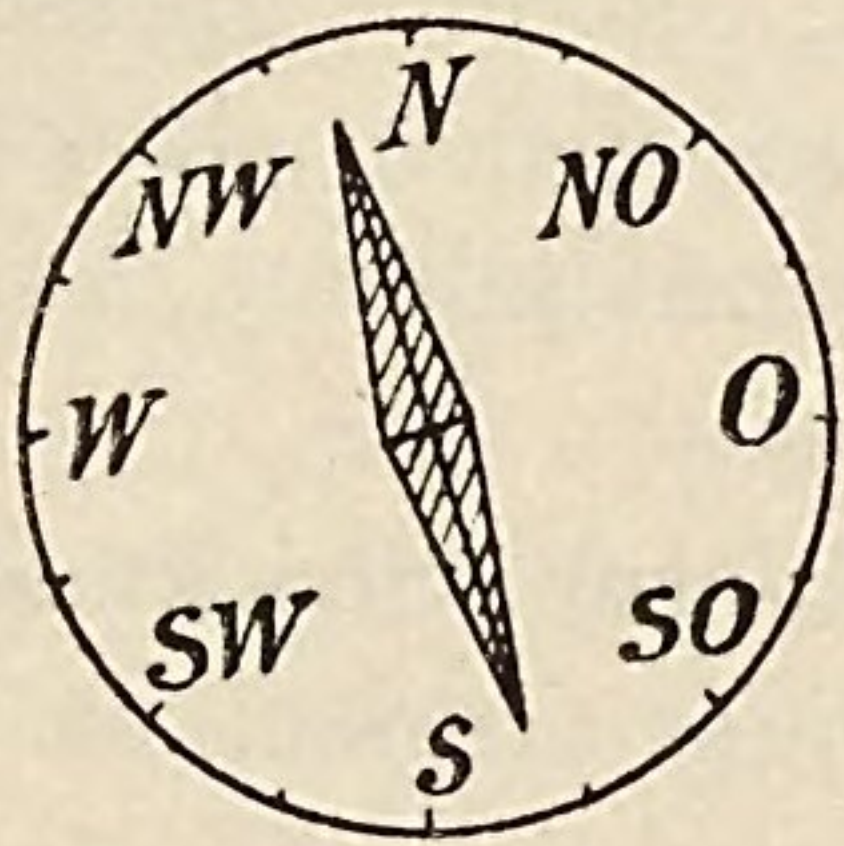


Fig. 89.

Auf Grund der Deklination lassen sich die Himmelsrichtungen an einem Orte der Erdoberfläche bestimmen. Das Instrument, welches diesem Zwecke dient, heisst Kompass; es besteht aus einer nach allen Richtungen frei beweglichen Büchse, in welcher eine Magnetnadel über einer mit einer Kreisteilung (Windrose) versehenen Horizontal-ebene (Fig. 89) horizontal frei schwingen kann.

Bringt man mit einer Magnetnadel eine zweite von gleicher magnetischer Stärke so in feste Verbindung, dass die entgegengesetzten Pole beider Nadeln nach derselben Richtung zeigen und hängt dieses Nadelpaar frei auf, so bleibt es in jeder Stellung in Ruhe, weil die eine Nadel die drehende Wirkung der anderen aufhebt; solche Nadelpaare heissen astatisch.

Eine Magnetnadel, welche sich mittelst einer durch ihren Schwerpunkt gehenden Achse in einer lotrecht stehenden Ebene frei bewegen kann (Fig. 90), bildet mit der Horizontalebene einen Winkel, welchen man magnetische Inklination nennt.

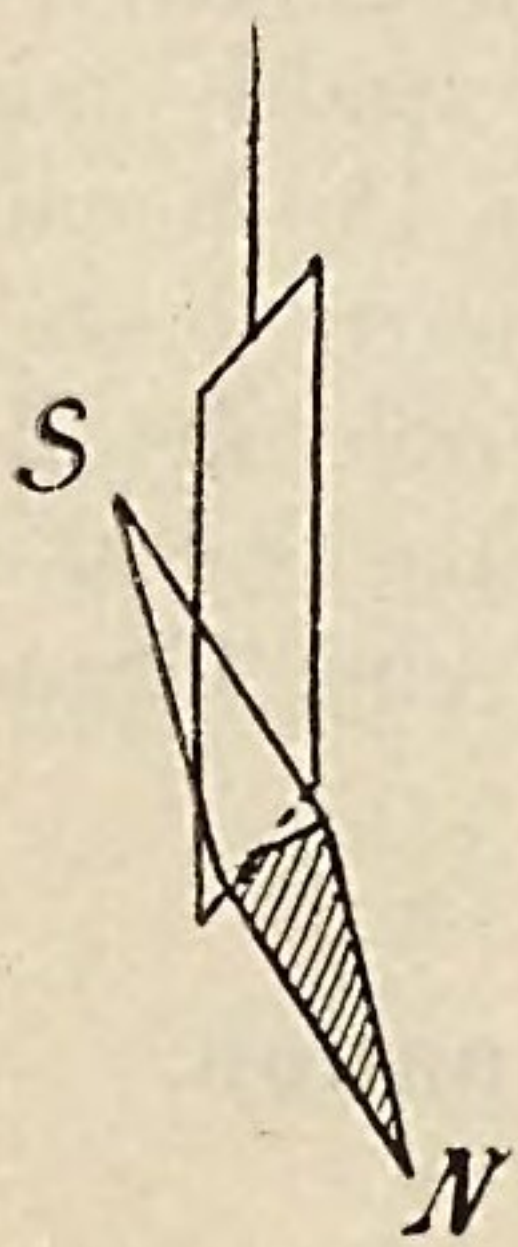


Fig. 90.

Auch diese ist nach Grösse und Richtung an verschiedenen Orten der Erde verschieden; bei uns zeigt der Nordpol der Nadel unter einem Winkel von etwa 65° gegen den Horizont nach unten. Linien, auf welcher die Orte gleicher Inklination auf der Erdoberfläche liegen, nennt man Isoklinen.

Hält man einen Eisenstab ungefähr in der Meridianebene unter einem Winkel von etwa 65° gegen den Horizont mit dem unteren Ende nach Norden, so wird er magnetisch, sein unteres Ende stösst den Nordpol, sein oberes den Südpol einer Magnetnadel ab.

Diese Thatsache sowie die Erscheinungen der Deklination

und Inklination lassen darauf schliessen, dass der Erdkörper selbst magnetische Kraft besitzt.

Diejenigen Punkte auf der Erdoberfläche, an welchen die Inklination 90° beträgt, heissen die magnetischen Pole der Erde; sie fallen mit den geographischen Punkten nicht zusammen; der magnetische Südpol, an welchem also eine Magnetnadel lotrecht und zwar mit ihrem Nordpole nach unten steht, liegt nördlich von Amerika, der magnetische Nordpol im südlichen Eismeere.

B. Reibungselektrizität.

100. Positive und negative Reibungselektrizität. Elektrizitätsleiter.

Versuche. Reibt man eine Glasstange mit einem Seidentuche oder eine Harzstange mit der behaarten Seite eines Tierfelles und nähert die Stange leichten Körperchen, etwa kleinen Papierstückchen oder Kügelchen aus Hollundermark, so springen diese zur Stange hin, bleiben an ihr ein wenig haften, werden fortgestossen, noch einmal angezogen u. s. f. Bringt man einen Finger in die Nähe der Stange oder des Tuches bzw. des Felles, so hört man ein Knistern, verspürt gleichzeitig einen leicht stechenden Schmerz und sieht im Finstern Funken überspringen.

Diese Vorgänge bezeichnet man als elektrische Erscheinungen und nennt das, was an dem Glase und der Seide oder dem Harze und dem Felle durch Reiben entsteht, Elektrizität.

Nähert man einem Hollundermarkkügelchen, welches mittelst eines Seidenfadens aufgehängt ist und eine mit Seide geriebene Glasstange berührt hatte, ein zweites an einem Seidenfaden befindliches Kügelchen von Hollundermark, so wird dieses von jenem zuerst angezogen, dann aber heftig abgestossen; das erste Kügelchen war also durch Berührung mit der Glasstange gleichfalls in den elektrischen Zustand versetzt worden. Bringt man beide Kügelchen mit einer geriebenen Glasstange oder beide mit einer Harzstange in Berührung, so stossen sie sich ab; wird aber das eine Kügelchen mit einer Glasstange, das andere mit einer Harzstange „geladen“, so ziehen sie sich an und bleiben längere Zeit an einander haften; später erweisen sich beide Kügelchen als unelektrisch.

Elektrizität lässt sich also von einem Körper auf einen anderen durch Berührung derselben übertragen.

Es gibt zwei Arten von Elektrizität; diejenige, welche an Glas durch Reiben mit Seide entsteht, nennt man die positive, die an Harz durch Reiben mit Haaren erzeugte die negative.

Körper, welche mit gleichartiger Elektrizität geladen sind, stoßen sich ab, entgegengesetzt geladene Körper ziehen sich an; letztere verhalten sich nach einiger Zeit wie ungeladene Körper.

Von zwei Körpern, durch deren Reibung Elektrizität entsteht, wird der eine stets positiv, der andere negativ elektrisch.

Um die Erscheinungen der Reibungselektrizität zu erklären, nimmt man gewöhnlich an, dass jeder Körper im unelektrischen Zustande beide Arten von Elektrizität in gleicher Menge enthalte; werden zwei Körper gerieben, so trennen sich die beiden Elektrizitätsarten und sammeln sich auf je einem der beiden Körper an; ein elektrisch geladener Körper enthält demnach einen Überschuss an Elektrizität der einen Art.

Wird ein Hollundermarkkugelnchen, das an einem Seidenfaden aufgehängt ist, elektrisch geladen, so bleibt ein zweites Kugelnchen, welches mit jenem durch einen trockenen Seidenfaden, ein Glas- oder Harzstäbchen verbunden ist, ungeladen; führt aber von dem geladenen Kugelnchen ein angefeuchteter Faden oder namentlich ein Metalldraht zu dem anderen, so erweist sich sowohl dieses wie die Seide bzw. der Draht als elektrisch geladen.

Manche Stoffe führen also Elektrizität leicht und rasch von einem geladenen Körper fort, andere nur sehr langsam oder fast gar nicht; erstere nennt man gute, letztere schlechte Leiter der Elektrizität. Gute Leiter sind alle Metalle, insbesondere Silber und Kupfer, zu den schlechten gehören Glas, Harz, Seide, Haare; wird ein Körper angefeuchtet, so leitet er besser als im trockenen Zustande.

Schlechte Leiter sind gute Elektrizitätserreger, weil sie die Elektrizität festhalten; soll Elektrizität von einem guten Leiter nicht fortgeführt werden, so muss dieser auf einem schlechten Leiter befestigt (isoliert) sein; soll dagegen ein Körper entladen werden, so berührt man ihn mit einem guten Leiter.

101. Das Elektroskop. Sitz der Elektrizität auf Körpern.

Elektrische Dichte und Spannung. Spitzenwirkung.

Um zu untersuchen, ob ein Körper elektrisch geladen ist, genügt ein isoliert aufgehängtes Hollundermarkkugelnchen (elek-

trisches Pendelchen); den Grad der Ladung sowie die Art der Elektrizität eines Körpers kann man am Elektroskope erkennen; dieses besteht aus einem Metallstäbchen AB (Fig. 91), das an dem einen Ende B eine Metallkugel (oder Metallplatte) trägt, an dem anderen aber zwei feine Gold- oder Aluminiumblättchen C, C' ; um diese vor Luftströmungen zu schützen, ist das Metallstäbchen in eine Glasglocke GH isoliert so eingesetzt, dass die Kugel ausserhalb, die Blättchen aber innerhalb des Glases sind. Berührt man die Kugel mit einem elektrisch geladenen Körper, so wird die Elektrizität durch den Metallstab auf die Blättchen fortgeleitet und diese stossen sich ab; je stärker die Ladung ist, desto grösser ist der Winkel, den sie bilden; dieser wird grösser, wenn man die Kugel von neuem mit Elektrizität der gleichen Art lädt, er nimmt ab, wenn man sie mit einem entgegengesetzt elektrischen Körper berührt.

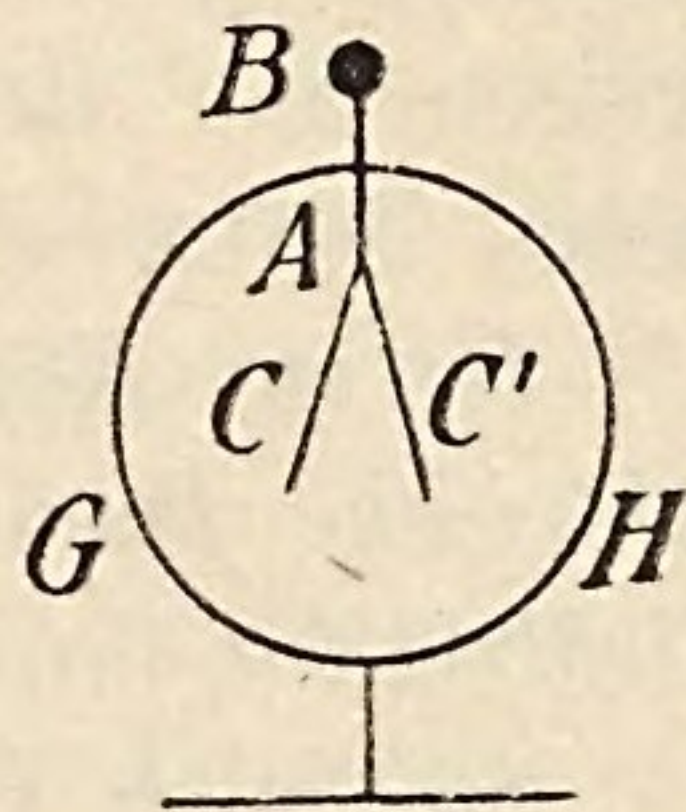


Fig. 91.

Versuche. Setzt man auf ein isoliertes Metallblech in der Mitte einen metallenen Stift auf und hängt an diesen ein elektrisches Pendelchen, so wird dieses bei elektrischer Ladung des Bleches abgestossen; stürzt man aber über den Stift ein Drahtnetz, welches das Blech berührt, so bleibt das Pendelchen unbeweglich, wenn man auch Blech und Netz elektrisch lädt.

Wird eine isolierte Metallkugel elektrisch geladen und dann mit zwei gut passenden metallenen, an isolierten Griffen befestigten Halbkugeln bedeckt, so ist die innere Kugel nach dem Abheben der Halbkugeln unelektrisch, diese aber geladen.

Aus diesen Versuchen schliesst man, dass die *Elektrizität nicht in das Innere der Körper eindringt, sondern an ihrer Oberfläche haften bleibt.*

Untersucht man verschiedene Stellen der Oberfläche eines elektrisch geladenen Körpers mittelst eines isoliert befestigten Metallscheibchens, so findet man, dass sich auf derselben nur dann überall gleichviel Elektrizität befindet, wenn der Körper die Gestalt einer Kugel hat; ist ein Körper nicht kugelförmig, so zeigt sich, dass an stärker gekrümmten Stellen, namentlich an Ecken und Kanten, mehr Elektrizität vorhanden ist als an flacheren Stellen. Die Elektrizitätsmenge, welche sich auf einem Quadratcentimeter an einer

Stelle der Oberfläche ansammelt, nennt man die elektrische Dichte an dieser Stelle.

Aus dem Umstande, dass die elektrische Dichte mit der Krümmung wächst, schliesst man, dass die Elektrizität das Bestreben hat, sich von dem Körper zu entfernen; man bezeichnet dieses Bestreben als elektrische Spannung.

Ist ein Körper mit Spitzen versehen, so wird an diesem die elektrische Dichte und mit ihr die Spannung so gross, dass die Elektrizität durch dieselben vom Körper ausströmt.

Soll also Elektrizität auf einem Körper festgehalten werden, so sind Ecken und Spitzen an seiner Oberfläche zu vermeiden; dagegen sind Spitzen anzubringen, wenn man die Entladung eines Körpers beschleunigen will.

Erreicht die elektrische Spannung auf zwei entgegengesetzt geladenen Körpern eine bestimmte Grösse, so erfolgt auch durch einen Isolator hindurch ein plötzlicher Ausgleich der Elektrizitäten in Begleitung einer Lichterscheinung, des sogenannten elektrischen Funkens.

102. Elektrische Verteilung (Influenz). Der Elektrophor. Die elektrischen Sammelapparate.

Versuche. Nähert man der Kugel eines Elektroskopes einen elektrisch geladenen Körper, jedoch ohne die Kugel zu berühren, so gehen die Blättchen des Elektroskopes auseinander. Bringt man dem einen Ende *A* (Fig. 92) eines isoliert auf-

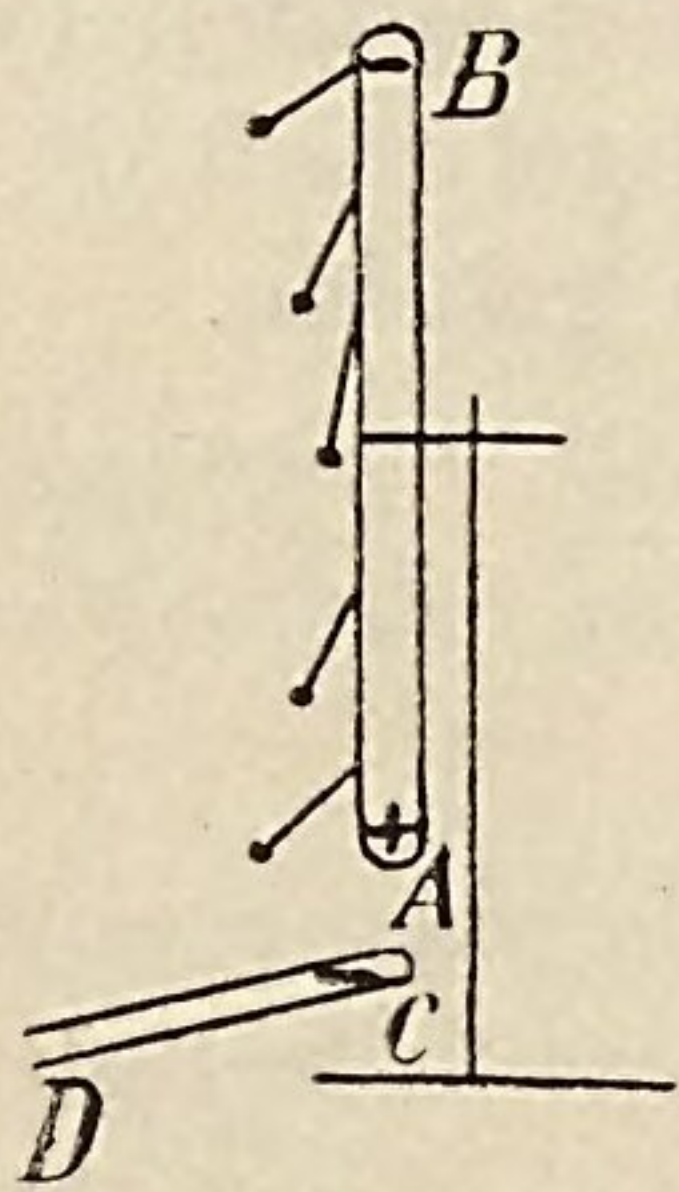


Fig. 92.

gestellten Metallcylinders *AB*, der oben und unten kugelförmig abgerundet ist und an verschiedenen Stellen seiner Oberfläche elektrische Pendelchen trägt, einen elektrisch geladenen Körper *CD* nahe, jedoch nur soweit, dass ein Überspringen eines Funkens nicht stattfinden kann, so werden die Pendelchen abgestossen, am meisten die an den Enden des Cylinders, fast gar nicht die in seiner Mitte. Untersucht man den Cylinder mit Hilfe eines Probependelchens, so findet man, dass das dem geladenen Körper zugewandte Ende

Elektrizität der entgegengesetzten, das abgewandte Ende aber solche der gleichen Art besitzt wie der Körper, solange sich dieser in der Nähe des Cylinders befindet. Entfernt man den Körper wieder, so fallen die Pendelchen zurück.

Berührt man den Cylinder, während der geladene Körper in seiner Nähe ist, mit dem Finger, so werden die Pendelchen an dem dem Körper zugewandten Ende des Cylinders stärker abgestossen, die am anderen Ende aber fast gar nicht. Entfernt man aber nun zuerst den Finger, dann den Körper, so stehen die Pendelchen überall vom Cylinder gleich weit ab und dieser erweist sich nun durchaus als dem Körper entgegengesetzt elektrisch geladen.

Annäherung eines elektrisch geladenen Körpers an einen nicht geladenen, isolierten Körper bewirkt in letzterem eine Trennung der Elektrizitäten und zwar so, dass der dem geladenen Körper zugewandte Teil entgegengesetzt, der abgewandte Teil gleichartig geladen erscheint. Diese Trennung der Elektrizitäten nennt man elektrische Influenz.

Nähert man einem ungeladenen Körper einen elektrisch geladenen und berührt gleichzeitig die Oberfläche des ungeladenen Körpers ableitend, so wird dieser ebenfalls geladen; man bezeichnet diesen Vorgang als „Ladung durch Influenz“. Die Elektrizität eines durch Influenz geladenen Körpers ist der des influenzierenden Körpers entgegengesetzt.

Die Influenzerscheinungen bestätigen die Ansicht, dass jeder Körper im unelektrischen Zustande beide Arten von Elektrizität enthält (100). Auch die Mitteilung von Elektrizität durch Berührung (100) lässt sich als eine Influenzerscheinung auffassen: die Elektrizität des geladenen Körpers bindet die ihr entgegengesetzte Elektrizität im ungeladenen Körper; dieser besitzt daher nach der Berührung der beiden Körper nach aussen wirkende, sogenannte freie Elektrizität der gleichen Art wie der geladene Körper.

Hat ein isolierter, unelektrischer Körper Spitzen, so wird er bei Annäherung eines elektrisch geladenen Körpers durch Influenz sehr rasch geladen, weil durch die Spitzen die Elektrizität, welche der des geladenen Körpers entgegengesetzt ist, leicht abströmt (101); da es den Anschein hat, als ob die Elektrizität des geladenen Körpers durch die Spitzen auf den ungeladenen Körper übergeströmt sei, so spricht man oft unrichtiger Weise von einer Saugwirkung der Spitzen ungeladener Körper.

Bei einer bestimmten elektrischen Spannung eines geladenen Körpers erfolgt zwischen seiner und der ihm entgegengesetzten Influenzelektrizität eines ungeladenen Körpers ein plötzlicher Ausgleich unter Entstehung eines elektrischen Funkens.

Der Elektrophor ist ein Apparat, mittelst dessen sich durch Influenz etwas grössere Mengen freier Elektrizität erzeugen

lassen; er besteht aus einer Platte von Harz oder hartem Gummi AB (Fig. 93), welche auf einer Metallplatte MN liegt und von

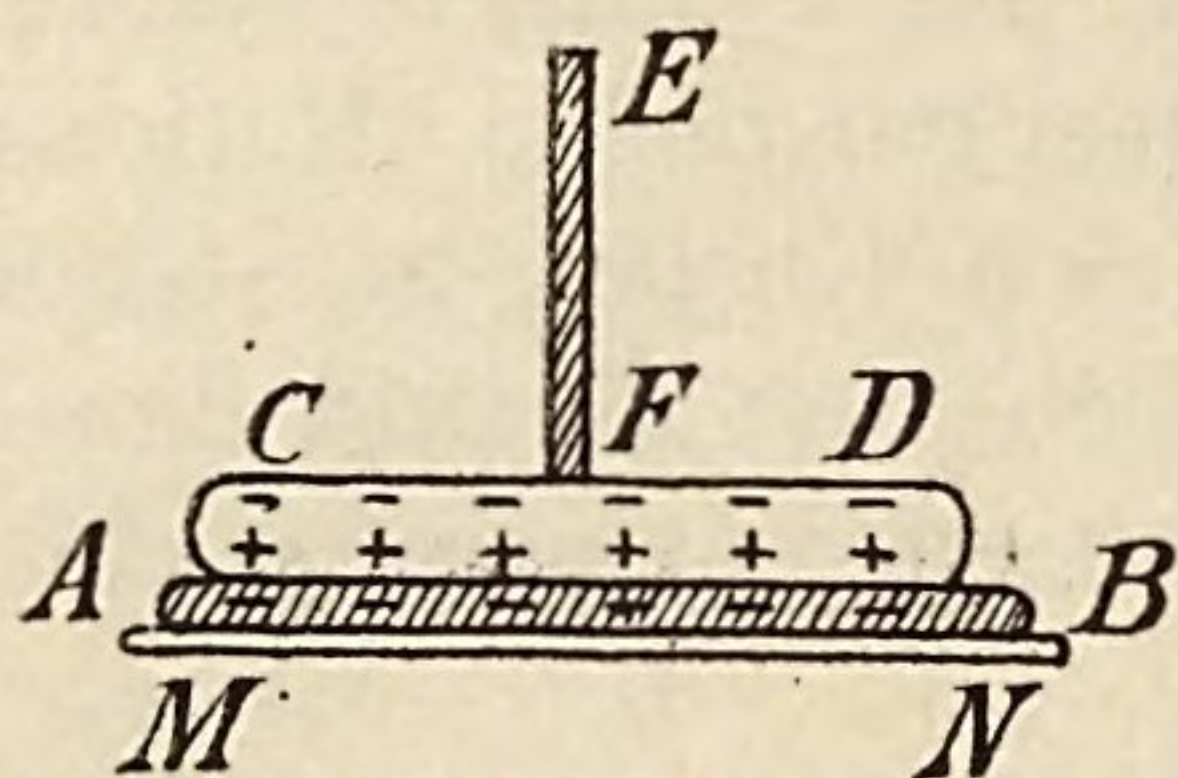


Fig. 93.

einem isoliert abhebbaren Schilde aus Metall CD bedeckt ist; Metallplatte und Schild dürfen sich nicht berühren.

Die Harzplatte wird durch Peitschen mit einem Tierfelle negativ elektrisch gemacht; sie wirkt influenzierend auf die Metallplatte und den Schild; der obere Teil der Metallplatte und der

untere Teil des Schildes werden also positiv, der untere Teil der Metallplatte und der obere Teil des Schildes negativ elektrisch. Berührt man daher den Schild oben mit der Hand, so dass die negative Elektrizität abgeleitet wird und hebt ihn dann mittelst des isolierenden Griffes EF ab, so enthält der Schild freie positive Elektrizität. Entlädt man den Schild, so kann er in der beschriebenen Weise von neuem positiv geladen werden und da sich dieser Vorgang beliebig oft wiederholen lässt, so dient der Elektrophor zur Erzeugung grösserer Mengen positiver Elektrizität.

Die Metallplatte wird, da ihre negative Elektrizität an die Erde fortgeleitet wird, positiv; sie wirkt also influenzierend auf die Harzplatte, so dass diese längere Zeit negativ elektrisch bleibt.

Auf Influenzwirkungen beruhen auch die Apparate, mit welchen man grössere Mengen von Elektrizität ansammeln kann; die gebräuchlichste Form derselben ist die Leydener Flasche, ein becherförmiges Glas, dessen Boden und Wände aussen und innen mit Staniol bezogen sind, aber so, dass unterhalb des Glasrandes ein Streifen von einigen Centimetern frei bleibt; dieser ist mit Lack überzogen. Im Inneren des Gefässes ist ein Metallstab mit Hilfe von Gummipplatten frei aufgestellt, der oben in eine Kugel ausläuft und mit dem inneren Staniolbelage in leitender Verbindung steht; um letztere zu erleichtern, befindet sich unten im Gefässe etwas Rauschgold.

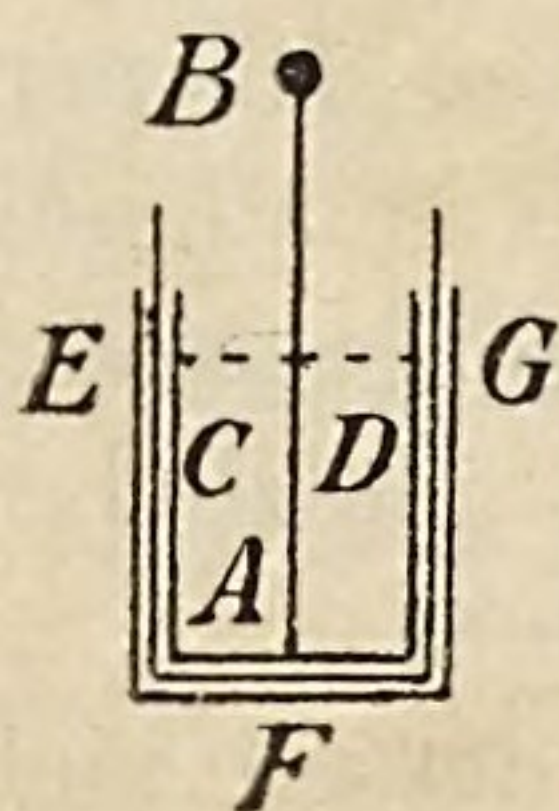


Fig. 94.

Teilt man dem Metallstabe AB (Fig. 97) etwa mit Hilfe des Elektrophores positive Elektrizität mit, so breitet sich diese auf dem inneren Staniolbelage CD aus und wirkt durch das Glas hindurch influenzierend auf den äusseren Belag EFG ; die dem Glase zugewandte Seite des letzteren wird also negativ, die andere aber positiv elek-

trisch. Setzt man nun den äusseren Belag mit der Erde in leitende Verbindung, so strömt die positive Elektrizität von demselben ab, er ist negativ elektrisch geladen und wirkt infolgedessen seinerseits bindend auf die positive Elektrizität des inneren Belags; man kann also diesem von neuem freie positive Elektrizität mitteilen und da sich dabei der obige Vorgang wiederholt, den inneren Belag immer wieder positiv laden u. s. f. Auf diese Weise sammelt sich auf dem inneren Belage eine grössere Menge positiver, auf dem äusseren ebensoviel negative Elektrizität an.

Die Flasche wird entladen, wenn man ihre beiden Beläge durch einen leitenden Entlader in Verbindung setzt; dieser besteht gewöhnlich aus einem Winkel aus Metalledraht ACB (Fig. 95), der an einem isolierenden Glasstabe CD befestigt ist und an beiden Enden seiner verstellbaren Schenkel je eine metallene Kugel trägt; legt man die eine Kugel desselben an den äusseren Belag der Flasche und nähert die andere der Kugel des Metallstabes, welcher mit dem inneren Belage in leitender Verbindung steht, so erfolgt ein Ausgleich der Elektrizitäten unter Entstehung eines kräftigen Funkens und eines Knalles.



Fig. 95.

Mehrere Leydener Flaschen, deren innere und äussere Beläge je in leitender Verbindung stehen, bilden eine elektrische Batterie.

In ähnlicher Weise wie die Leydener Flasche wirkt auch die Franklinsche Tafel, eine ebene Glasplatte, die beiderseits so mit Staniol bedeckt ist, dass rings um dasselbe ein Rand frei bleibt.

103. Die Elektrisiermaschinen. Wirkungen elektrischer Ströme.

Um Elektrizität von höherer Spannung auf bequeme Weise zu erhalten, bedient man sich der Elektrisiermaschinen; es gibt zwei Arten derselben, die Reibungs- und die Influenzmaschine.

a) Die Reibungsmaschine.

Eine kreisförmige Glasscheibe G (Fig. 96) reibt sich beim Drehen um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Achse an zwei einander gegenüberstehenden Kissen aus Leder R , welche an der der Scheibe zugewandten Seite mit einem Gemische von Zinn,

Zink und Quecksilber bestrichen sind; das Glas wird infolgedessen positiv, das Reibzeug negativ elektrisch. In einiger Ent-

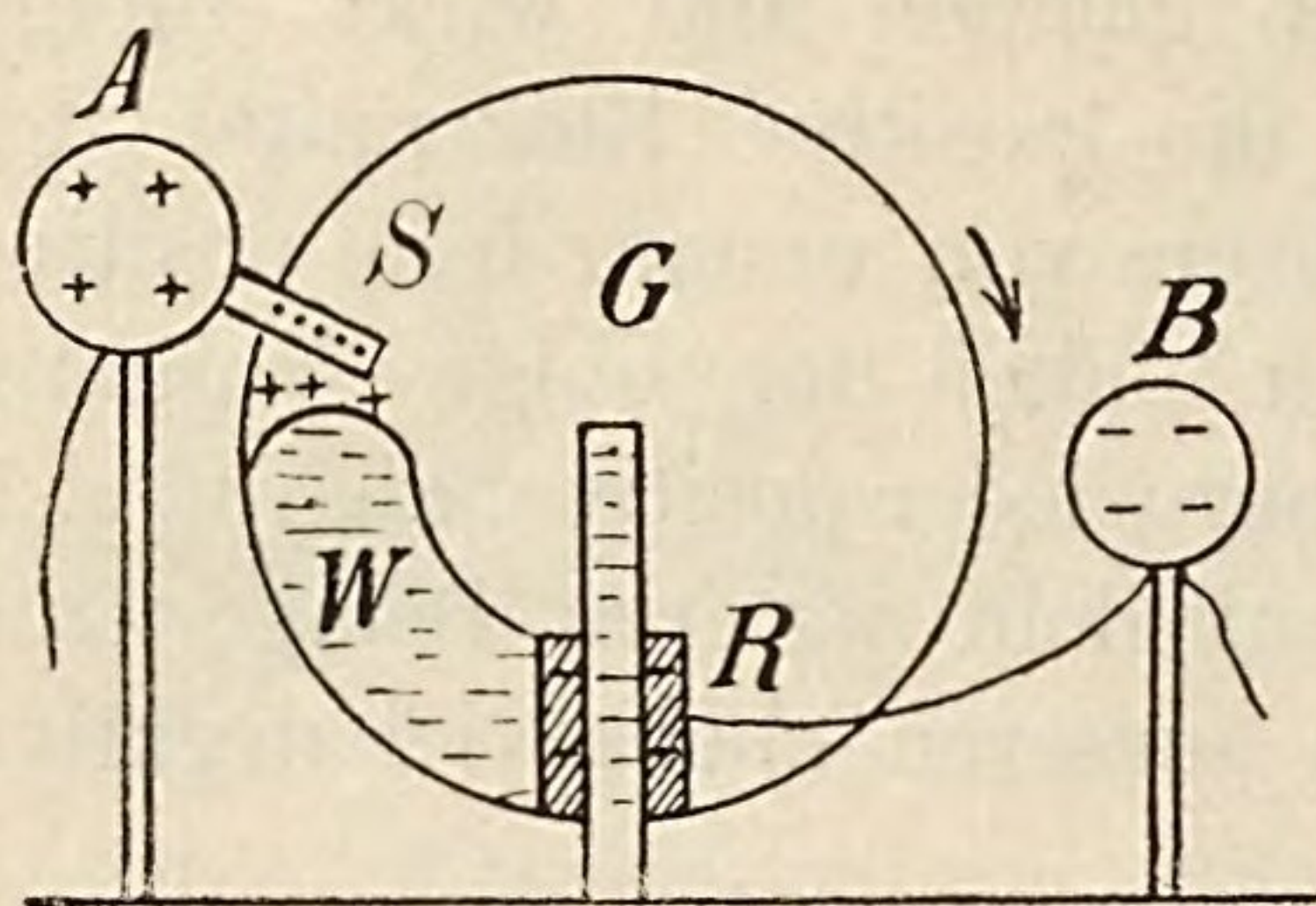


Fig. 96.

fernung von letzterem sind zu beiden Seiten der Glasscheibe metallene Spitzen S angebracht, welche mit einer isoliert aufgestellten Metallkugel, dem Konduktor A , in leitender Verbindung stehen; die negative Elektrizität des Konduktors strömt durch die Spitzen ab und wird durch die positive Elektrizität der

Scheibe (102) gebunden; der Konduktor A wird also positiv geladen. Damit die im Glase erzeugte positive Elektrizität nicht entweichen kann, bevor sie die Metallspitzen erreicht, ist die Scheibe durch einen Mantel von Wachseleinwand W geschützt, der vom Reibzeuge bis nahe zu den Spitzen reicht. Auch das Reibzeug steht mit einem isolierten Konduktor B in leitender Verbindung, so dass sich auf diesem die negative Elektrizität ansammelt. Je nachdem man freie positive oder negative Elektrizität zur Verfügung haben will, muss man den Konduktor B oder A leitend mit dem Erdboden verbinden. Werden die beiden Konduktoren, während die Maschine im Gange ist, in leitende Verbindung gebracht, so gleichen sich die Elektrizitäten derselben beständig aus; man sagt, es entstehen elektrische Ströme und zwar ein positiver vom Konduktor A gegen B und gleichzeitig ein negativer von B nach A .

b) Die Influenzmaschine.

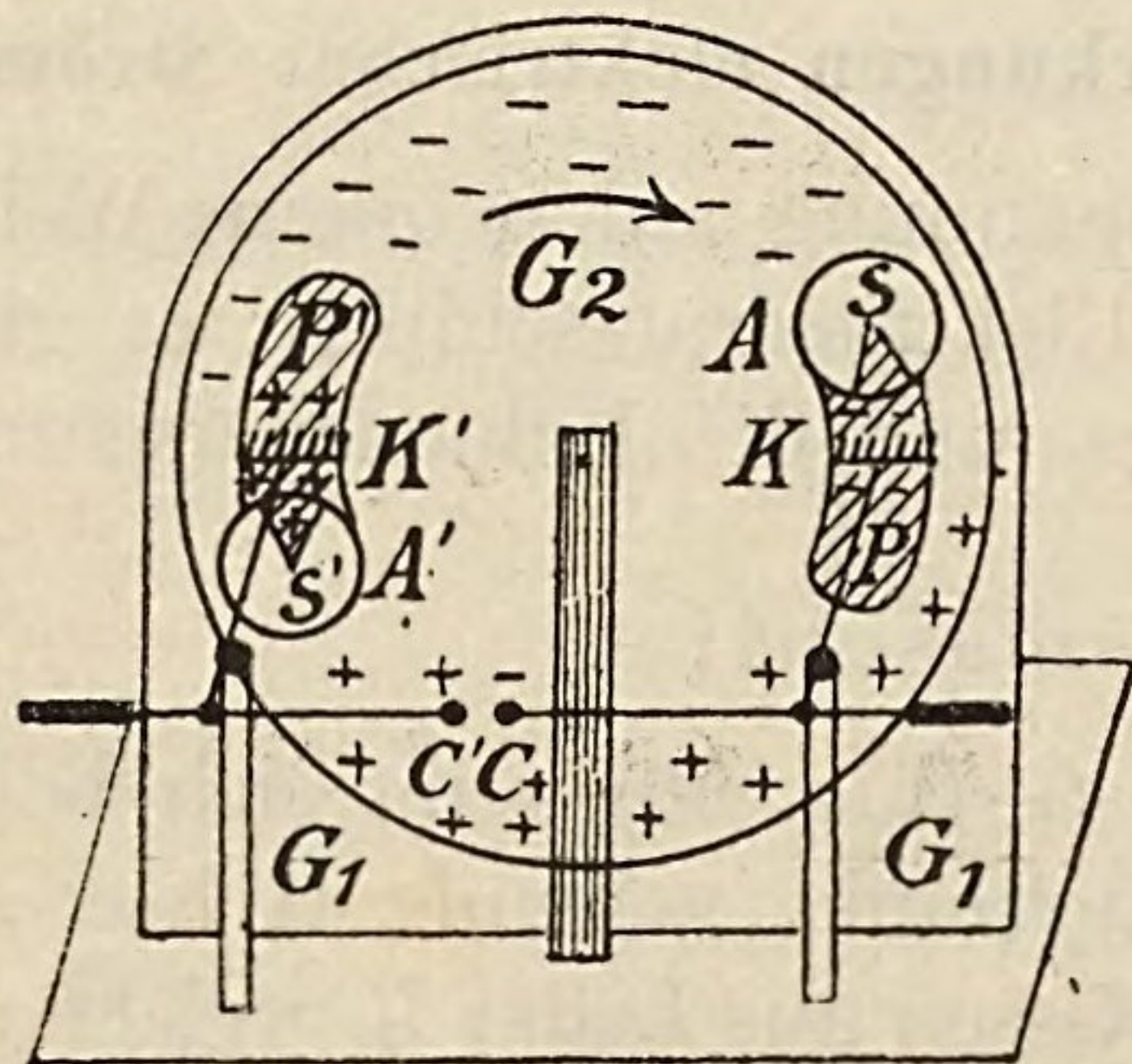


Fig. 97.

Diese weit wirksamere Vorrichtung besteht zunächst aus zwei parallel gestellten Glasscheiben, von denen die eine G_1 befestigt, die andere G_2 aber drehbar ist; erstere besitzt an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen kreisförmige Ausschnitte A, A' , in welche die mit Staniol bedeckten Spitzen S, S' von Papierbelagen P, P' hineinragen; gegen-

über von diesen Ausschnitten sind auf der anderen Seite der beweglichen Glasscheibe Metallspitzen K, K' , sogenannte Saugkämme angebracht, welche mit kleinen isolierten Kugeln C, C' in leitender Verbindung stehen; letztere können bis zur Berührung genähert oder von einander entfernt werden.

Lädt man nun eine der beiden Staniolspitzen, etwa S mittelst einer mit Katzenfell gepeitschten Gummiplatte negativ, so wirkt diese influenzierend auf die drehbare Glasscheibe; der der Spitze S zugewandte Teil der letzteren wird also positiv, der den Metallspitzen K gegenüberliegende aber negativ elektrisch; aus letzterem strömt also die positive Elektrizität des Konduktors C aus und dieser wird negativ geladen. Wird nun die Glasscheibe in der Richtung gegen die Spitzen S, S' gedreht, so wird die aus dem Saugkämme K ausströmende, überschüssige, positive Elektrizität durch den unteren Teil der Scheibe bis zur Spitze S' fortgeführt und macht diese durch Influenz positiv elektrisch, so dass S' im entgegengesetzten Sinne von S wirkt; der Konduktor C' wird also positiv geladen. Bei fortgesetzter Drehung wirken demnach die Spitzen S, S' beständig influenzierend auf die Konduktoren C, C' , die drehbare Scheibe aber influenzierend auf die Spitzen S, S' ; dadurch entstehen Ströme von hoher Spannung.

Bei Ingangsetzung der Maschine müssen sich die Konduktoren C, C' berühren, damit die erzeugte Elektrizität nicht in die Luft abströmen kann; um die Ladung in der Maschine festzuhalten, auch wenn die Konduktoren sich nicht berühren oder falls die Drehung des Rades einige Zeit unterbrochen wird, sind gegenüber den Papierbelagen noch ein zweites Paar von leitend verbundenen Saugkämmen angebracht und über die Konduktoren hohle Glasröhren gelegt, welche nach Art der Leydener Flaschen innen und aussen mit Staniol beklebt sind; beide Vorrichtungen ermöglichen eine Bindung der Elektrizität innerhalb der Maschine, verhüten also ein Abströmen derselben nach aussen hin.

Will man Elektrizität der einen Art benützen, so muss man den Konduktor, welcher mit der anderen Art geladen ist, leitend mit der Erde verbinden. Berühren sich die beiden isoliert gehaltenen Konduktoren oder werden sie durch einen Metalldraht verbunden, so entstehen elektrische Ströme.

Versuche mit der Elektrisiermaschine.

Entfernt man die beiden Konduktoren einer geladenen Influenzmaschine allmählich von einander, so springen anfangs schwache

Lichtfunken in rascher Aufeinanderfolge, dann immer stärkere in grösseren Pausen über; starke Funken bewegen sich in zickzackförmigen Linien und erzeugen in der Luft einen heftigen Knall. Lässt man den elektrischen Funken durch eine mit einem verdünnten Gase erfüllte Glasröhre schlagen, in welche zu diesem Zwecke zwei Platindrähte eingeschmolzen sind (Geisslersche Röhre), so leuchtet das Gas hell und je nach seiner Beschaffenheit verschiedenfarbig auf. An den Spitzen des Saugkammes, aus welchem die positive Elektrizität ausströmt, sieht man im Dunkeln farbige Lichtkegel (Büschellicht), während an den Zähnen des anderen Kammes leuchtende Punkte (Glimmlicht) auftreten.

Lässt man elektrische Funken durch einen kurzen, sehr dünnen Eisendraht schlagen, so wird dieser erwärmt und kommt, wenn die elektrische Spannung stark genug ist, zum Glühen und Schmelzen (Entzündung von Sprengminen). Verbindet man ein metallenes Schälchen, in dem sich etwas Äther befindet, leitend mit dem einen Konduktor einer Elektrisiermaschine und lässt vom anderen einen elektrischen Funken auf eine mit dem Schälchen in Verbindung stehende Drahtspitze schlagen, so wird der Äther entzündet.

Dünne Glasscheiben, Pappdeckel werden vom elektrischen Funken durchbohrt; schlägt dieser unter Wasser von einer Drahtspitze zu einer sehr nahe befindlichen anderen über, so erleidet das Wasser starke Erschütterungen.

Leitet man durch einen um eine Glasröhre gewickelten Kupferdraht einen Strom der Elektrisiermaschine, so wird ein in der Glasröhre liegender Eisendraht magnetisch; wird der Strom unterbrochen, so verliert der Draht den Magnetismus wieder. Berührt man mit der einen Hand den einen und nähert dem zweiten Konduktor die andere Hand, so springt auf letztere ein Funke über und man verspürt gleichzeitig ein Zucken in den Armmuskeln.

104. Blitz und Donner. Der Blitzableiter.

Der Blitz ist im Grossen dieselbe Erscheinung wie der elektrische Funke an der Elektrisiermaschine im Kleinen; er entsteht dann, wenn ein Ausgleich zwischen den Elektrizitäten zweier entgegengesetzt geladenen Wolken oder zwischen der Elektrizität einer Wolke und der durch ihre influenzierende Wirkung in

der Erde hervorgerufenen, entgegengesetzten Elektrizität stattfindet; im letzteren Falle trifft er vorzugsweise solche Gegenstände, welche über ihre Umgebung hervorragen, weil diese sich wie Spitzen verhalten (101); er bringt dieselben Wirkungen hervor wie der elektrische Funke, aber in weitaus höherem Grade; er entzündet brennbare Gegenstände, zertrümmert schlechte, schmelzt gute Leiter, verletzt und tötet organische Wesen. — Der Donner ist ein Schall, welchen das Aufeinanderprallen der durch den Blitz zerrissenen Luftschichten erzeugt.

Über die Ursache der Gewitter sind wir noch im Unklaren; man schreibt ihre Entstehung entweder der Verdichtung des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes zu oder der Reibung des letzteren, sei es an den Staubteilchen, welche die aufsteigende Luft mit sich führt, sei es an den Eisnadeln, die in höheren Luftschichten schweben.

Um Gebäude vor Blitzschlägen zu schützen, bringt man Blitzableiter an; diese bestehen aus einer am höchsten Punkte des Hauses befestigten Auffangstange, welche oben in eine oder mehrere vergoldete Spitzen ausläuft, dem von dieser ausserhalb des Hauses zur Erde führenden Leitungsdrahte und einer in feuchtes Erdreich versenkten Metallplatte, mit welcher der Draht leitend verbunden ist. Der Blitzableiter schützt das Haus in erster Linie insoferne, als die von einer elektrisch geladenen Wolke durch Influenz in der Erde erzeugte entgegengesetzte Elektrizität durch seine Spitzen ausströmt und infolgedessen auf die Wolke entladend einwirkt; dann aber auch dadurch, dass er als guter Leiter den einschlagenden Blitz ohne Gefahr für das Haus zur Erde führt.

C. Berührungselektrizität.

105. Positive und negative Berührungselektrizität.

Galvanische Elemente und Batterien.

Versuche. Drückt man zwei an isolierenden Griffen befestigte kreisförmige Metallplättchen, etwa das eine von Kupfer, das andere von Zink an einander, hebt sie dann ab und nähert sie von beiden Seiten einem beispielsweise negativ geladenen elektrischen Pendelchen, so bewegt sich dieses gegen das Zink hin; letzteres ist also positiv, Kupfer negativ elektrisch geworden.

Bedeckt man die Metallplatte eines Elektroskopes mit einem dünnen, allseitig über jene hervorstehenden Glasplättchen, legt

auf dieses ein Stück angesäuerten Fliesspapiere und berührt nun mittelst eines gebogenen isoliert gehaltenen Metallstreifens die Metallplatte und das Papier, so zeigt sich das Elektroskop, nachdem man die Glasplatte mit dem Fliesspapiere und den Metallstreifen entfernt hat, als negativ elektrisch; bringt man dagegen nur den Metallstreifen fort, lässt also Glasplatte und feuchtes Papier liegen, so zeigt das Elektroskop positive Elektrizität an.

Die grösste Divergenz der Blättchen am Elektroskope ergibt sich, wenn der Metallstreifen aus Zink ist, eine geringere bei Kupfer, noch schwächer ist sie bei Platin oder bei Kohlenstäbchen.

Elektrizität entsteht also auch, wenn sich zwei Metalle oder wenn sich ein Metall und eine Flüssigkeit berühren; im ersteren Falle wird das eine Metall positiv, das andere negativ, im letzteren meistens die Flüssigkeit positiv, das Metall aber negativ elektrisch.

Die Kraft, welche die Trennung der Elektrizitäten hervorruft, ist jedenfalls durch eine chemische Änderung der sich berührenden Stoffe hervorgerufen; sie wird elektromotorische Kraft genannt. Die Berührungselektrizität hat eine geringere Spannung als die Reibungselektrizität, wird aber ununterbrochen erzeugt, solange ein Metall mit einem anderen oder mit einer Flüssigkeit in Berührung ist.

Bringt man zwei verschiedene Metalle in eine Flüssigkeit und verbindet sie ausserhalb derselben durch einen guten Leiter, so müssen wegen der Ungleichheit der Spannungen an den Berührungsstellen der Metalle mit der Flüssigkeit ununterbrochene, elektrische Ströme entstehen.

Jedes der beiden Metalle wird zwar durch die Berührung meistens negativ elektrisch; da aber die elektrische Spannung an den Berührungsstellen der Flüssigkeit und des einen Metalles grösser ist als die am anderen Metalle und da von der in der Flüssigkeit entstehenden positiven Elektrizität durch Leitung auf das eine Metall ebensoviel übergeht, als an dem anderen entsteht, so muss an dem einen Metall ein Überschuss von freier positiver, an dem anderen ein gleich grosser von negativer Elektrizität, also bei leitender Verbindung der Metalle je ein Strom vom einen zum anderen entstehen.

Eine Vorrichtung, bei welcher zwei Metalle mit einer Flüssigkeit in leitender Verbindung stehen, nennt man (nach ihrem Entdecker) ein galvanisches oder (nach ihrem Erforscher) ein

voltasches Element; dasjenige Metall, an welchem freie positive Elektrizität auftritt, heisst der positive Pol des Elements, das andere der negative Pol; das Element heisst geschlossen, wenn seine Pole leitend verbunden sind, geöffnet, wenn die leitende Verbindung unterbrochen ist.

Die elektromotorische Kraft eines Elementes ist durch die Differenz der an seinen Polen vorhandenen Spannungen bestimmt.

In einem geschlossenen Elemente bewegt sich der positive Strom vom positiven Pole durch den Leiter (ausserhalb des Elementes) zum negativen Pole und durch die Flüssigkeit (innerhalb des Elementes) zurück zum positiven Pole; der negative Strom geht vom negativen Pole aus und hat die entgegengesetzte Richtung des positiven Stromes. Gewöhnlich zieht man nur den positiven Strom in Betracht und nennt diesen kurzweg „den“ Strom des Elementes.

Statt einer Flüssigkeit wendet man oft deren zwei an, füllt die eine in einen porösen Thoncylinder und taucht diesen in die andere; dadurch können sich die Flüssigkeiten nicht mischen, kommen aber doch derartig in Berührung, dass der elektrische Strom wie bei einer Flüssigkeit entstehen kann.

Der elektrische Strom bringt in den Flüssigkeiten sowohl als namentlich an den Metallplatten chemische Änderungen hervor, welche eine Abnahme der elektromotorischen Kraft an den Berührungsstellen nach sich ziehen (106c). Elemente, deren Wirkung längere Zeit nahezu die gleiche bleibt, heissen konstant.

Die gebräuchlichsten Elemente sind

- a) das Daniellsche; dieses besteht aus Zink in einem Thoncylinder, der mit Schwefelsäure gefüllt ist und Kupfer in einer Lösung von Kupfervitriol.
- b) Das Bunsensche; Kohle taucht in rauchende Salpetersäure, Zink in verdünnte Schwefelsäure; Thoncylinder.
- c) Das Chromsäureelement; Kohle und Zink tauchen in eine Lösung von chromsaurem Kali und verdünnter Schwefelsäure; das Zink wird erst beim Gebrauche des Elementes in die Säure getaucht (Tauchelement).
- d) Das Leclanchésche Element; Kohle, welche mit Braunstein umgeben ist und Zink befinden sich in einer Salmiaklösung.

- e) Die sogenannten Trockenelemente bestehen aus sehr vielen Schichten von unechtem Gold- und Silberpapier (richtiger Kupfer- und Zinkpapier), welche so aufeinandergelegt sind, dass sich jedesmal Kupfer und Zink berühren; die hygroskopische Feuchtigkeit des Papiers ersetzt die Flüssigkeit.

Bei all diesen Elementen ist Zink der negative, Kupfer oder Kohle der positive Pol.

Eine Zusammenstellung von Elementen, bei welchen je ein

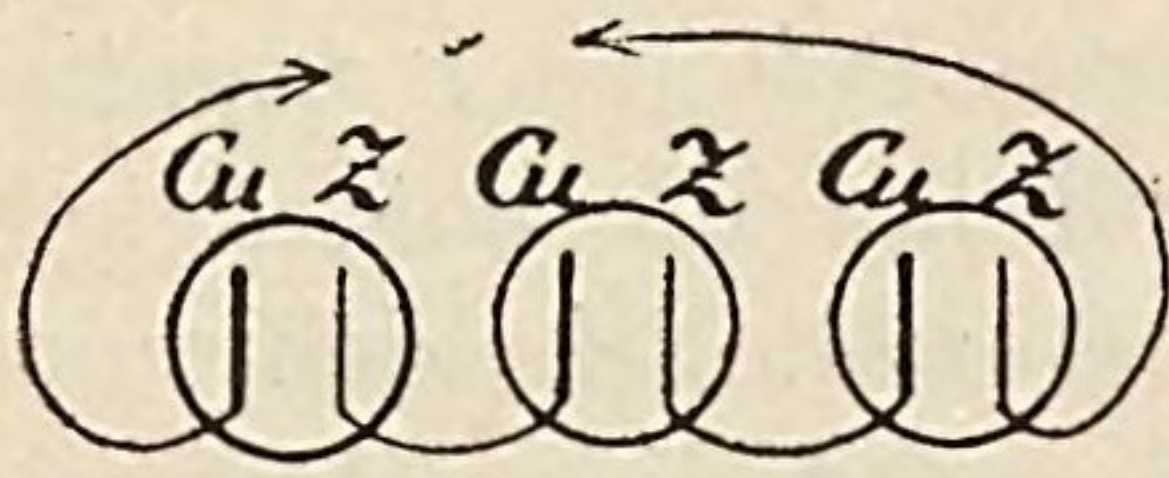


Fig. 98 a.

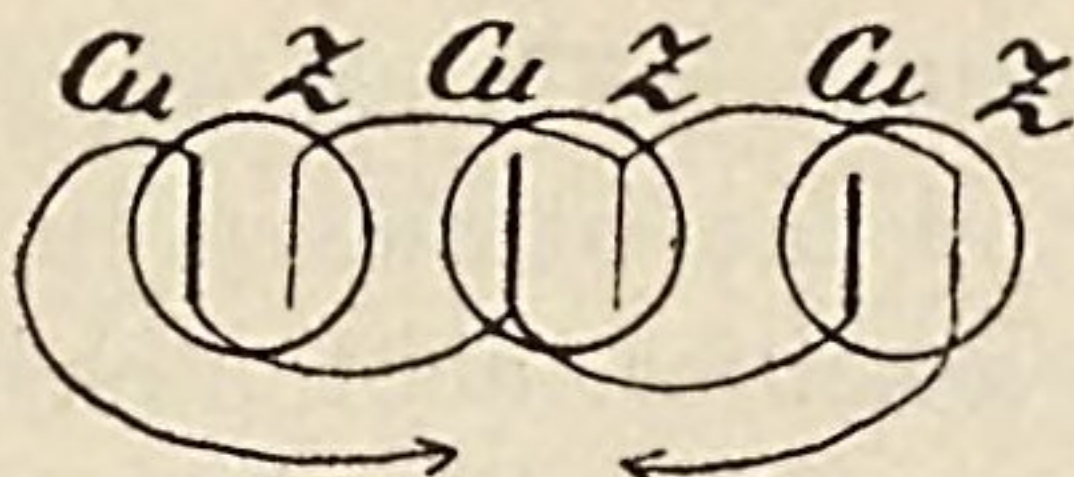


Fig. 98 b.

Metall des einen mit einem des anderen leitend verbunden ist, nennt man eine galvanische Batterie; die Elemente heissen hintereinandergeschaltet, wenn immer ein positiver Pol des einen mit einem negativen des anderen verbunden ist (Fig. 98 a), nebeneinandergeschaltet, wenn je alle positiven und alle negativen Pole untereinander in Verbindung stehen (Fig. 98 b).

Um Verbindungen leicht herstellen und unterbrechen zu können, wendet man Klemmschrauben an, metallene Klötzchen, in welchen die Enden zweier von den Polen eines Elementes

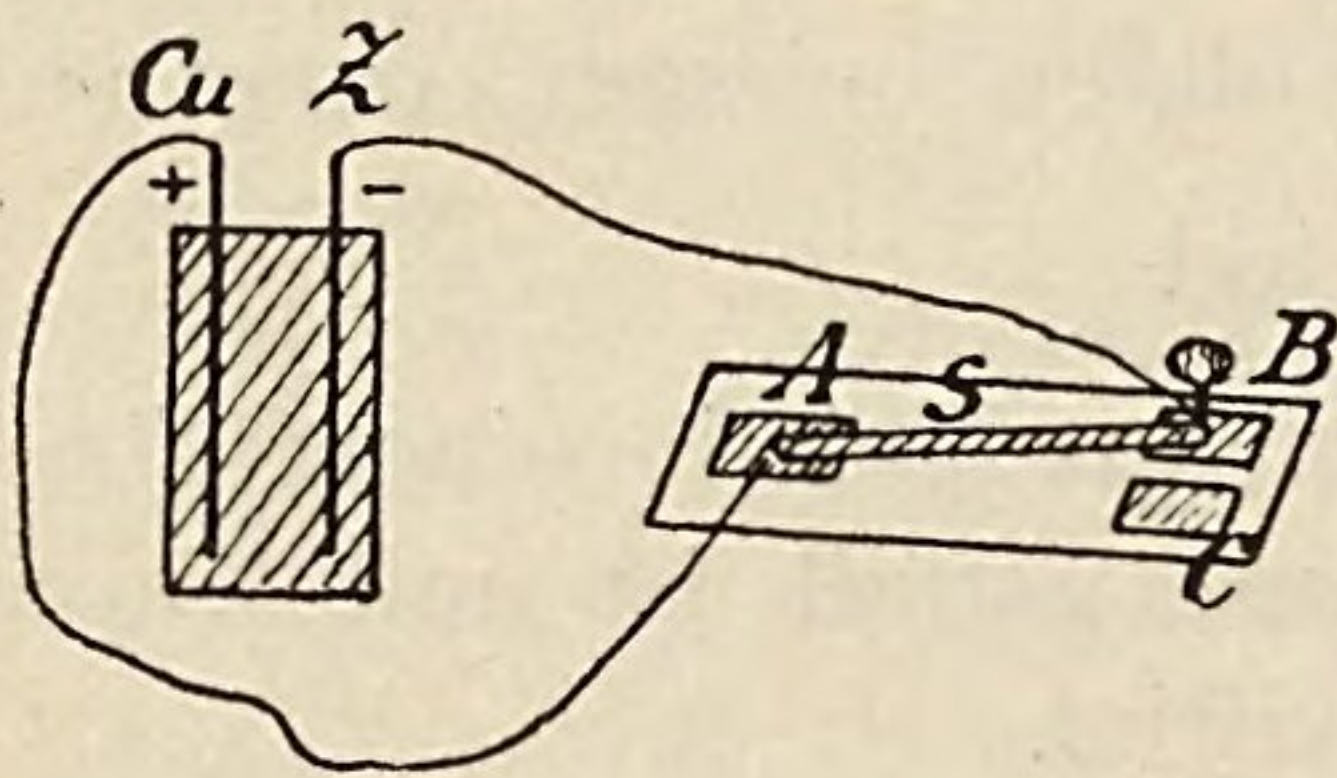


Fig. 99.

oder einer Batterie kommenden Drähte festgeklemmt werden; bequemes Schliessen und Öffnen eines Elementes oder einer Batterie gestatten die Stromschlüssel; sie bestehen in ihrer einfachsten Form aus einem Metallstäbchen *S* (Fig. 99), dessen eines Ende durch

eine Schraube mit einem Metallklötzchen *A* beweglich verbunden ist, während das andere Ende entweder mit dem Metallstückchen *B* oder mit *C* in Berührung gebracht werden kann; in *A* und *B* sind die Leitungsdrähte einer Batterie festgeklemmt, *C* ist isoliert; in der Stellung *AB* ist der Strom geschlossen, in der Stellung *AC* geöffnet.

106. Wirkungen galvanischer Ströme.

a) Wärme- und Lichterzeugung.

Das elektrische Glüh- und Bogenlicht.

Versuche. Die Drähte, welche von den Polen einer Batterie kommen, fühlen sich in der Nähe ihrer Berührungsstelle warm an. Leitet man den Strom einiger Elemente durch einen kurzen, dünnen Eisendraht, so glüht dieser und brennt ab. Verkohlter Baumwollfaden, welcher durch Einschliessung in ein luftleeres Gefäss vor dem Verbrennen geschützt ist, kommt in Weissglut und strahlt helles Licht aus. (Elektrisches Glühlicht.)

Bringt man die Enden zweier von den Polen einer Batterie ausgehenden Drähte zur Berührung oder trennt man sie von einander, so entsteht an der Berührungsstelle ein Funke.

Befestigt man das eine Drahtende an einer Feile und fährt mit der anderen unter leichtem Drucke über dieselbe hin, so sprühen von letzterem Funken weg.

Ströme von vielen, hintereinander geschalteten Elementen erzeugen beim Übergange zwischen zwei Kohlenspitzen, welche sich nicht berühren, aber sehr nahe bei einander sind, einen intensiv glänzenden, sichelförmigen Lichtbogen (Elektrisches Bogenlicht). Die Kohlenspitze, durch welche der positive Strom geht, höhlt sich trichterförmig aus, die negative aber wird mit einer Haube von Kohlenteilchen bedeckt. Durch geeignete Vorrichtungen müssen die Kohlenspitzen stets in gleicher Entfernung gehalten werden.

Der galvanische Strom erzeugt beim Übergange aus einem dickeren in einen dünneren Draht oder beim Durchdringen eines schlechten Leiters Wärme, die sich bis zur Weissglut steigern kann. Der positive Strom reisst von dem Körper, aus welchem er ausfliesst, Teilchen los und bringt sie zum Glühen.

b) Magnetisierung durch elektrische Ströme; Einfluss derselben auf Magnetnadeln. Das Galvanometer.

Versuch. Umwickelt man einen Stab aus weichem Eisen schraubenförmig und stets im gleichen Sinne mit übersponnenem Kupferdrahte und leitet durch den Draht einen elektrischen Strom, so wird das Eisen magnetisch; wird der Strom unter-

brochen, so verliert das Eisen seinen Magnetismus fast vollständig wieder; gestähltes Eisen aber bleibt magnetisch.

Ein galvanischer Strom erzeugt in einem Eisenstabe, welchen er spiralförmig umfließt, Magnetismus; einen auf diese Weise hergestellten Magneten nennt man einen Elektromagneten.

Der Südpol eines Elektromagneten liegt immer an demjenigen Ende desselben, an welchem ein senkrecht gegen den

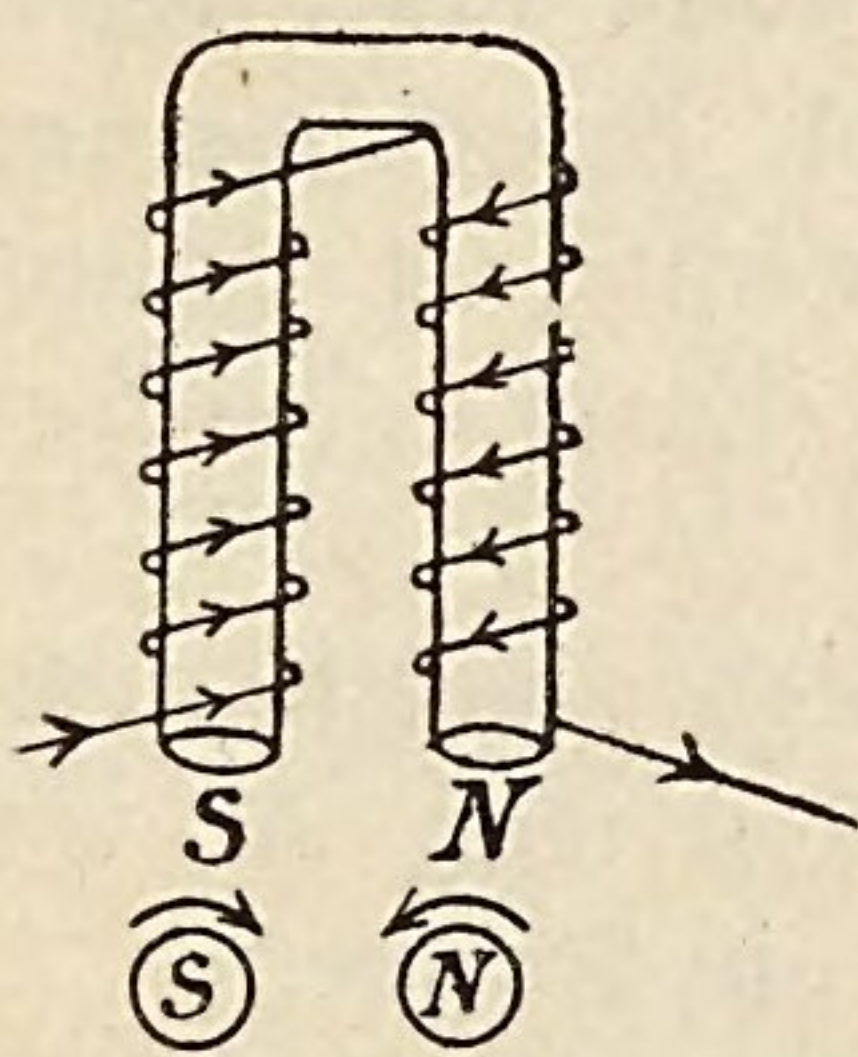


Fig. 100.

Querschnitt des Stabes gerichtetes Auge den positiven Strom im Sinne der Bewegung eines Uhrzeigers erblickte (Fig. 100), der Nordpol da, wo der Strom bei gleicher Stellung des Auges sich gegen den Uhrzeiger bewegt. Elektromagnete haben dieselben Eigenschaften wie die auf andere Weise (98) erzeugten Magnete. Man stellt sich deshalb vor, dass jeder Magnet ein von gleich gerichteten elektrischen Strömen umflossener Körper sei.

Versuch. Führt man über eine horizontal frei schwebende Magnetnadel NS (Fig. 101) parallel zur Achse derselben mittelst

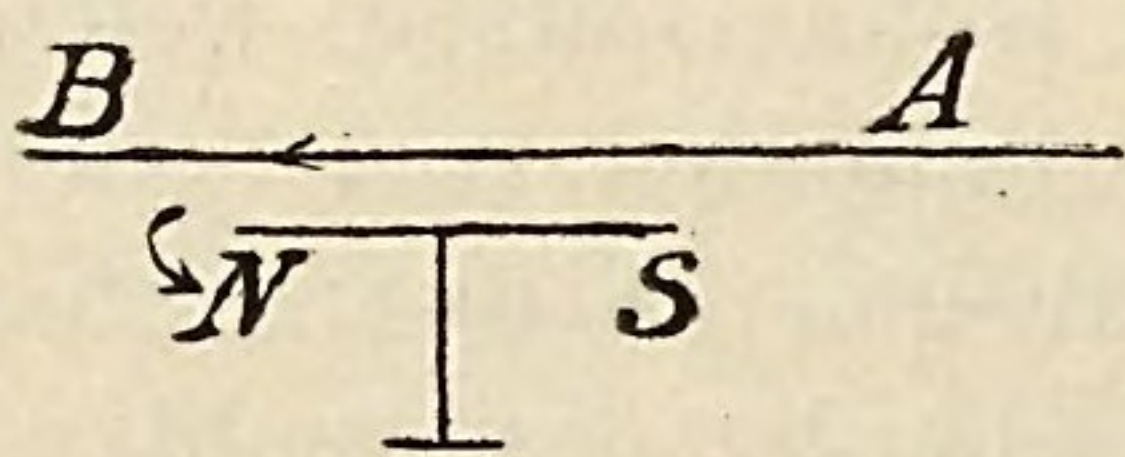


Fig. 101.

eines Kupferdrahtes AB einen elektrischen Strom, so wird der Nordpol der Nadel nach Westen abgelenkt, wenn sich der positive Strom in der Richtung vom Süd- zum Nordpole des Magneten bewegt; dagegen weicht der Nordpol der Nadel nach Osten aus,

wenn der positive Strom über derselben vom Nord- gegen den Südpol fließt. Wird aber der Strom unterhalb einer Magnetnadel parallel zu ihrer Achse geführt, so erfolgt ihre Ablenkung unter sonst gleichen Umständen im entgegengesetzten Sinne wie bei einem oberhalb derselben fließenden Strome.

Entsprechende Ablenkungen erfährt eine in lotrechter Ebene frei schwebende Nadel durch elektrische Ströme, welche parallel mit derselben verlaufen; so wird beispielsweise der Nordpol einer solchen, horizontal stehenden Nadel gehoben, wenn ein Strom in horizontaler Richtung parallel zur Nadel auf der Ostseite derselben vom Süd- gegen den Nordpol verläuft.

Ein galvanischer Strom, welcher sich neben einer Magnetnadel parallel zur Achse derselben bewegt, lenkt dieselbe so ab, dass eine mit dem positiven Strome schwimmende menschliche Figur, welche

gegen den Nordpol der Nadel blickt, diesen nach links hin ausweichen sieht. (Ampère'sche Regel.)

Führt man eine Drahtleitung oberhalb einer horizontal schwingenden Magnetnadel parallel ihrer Achse hin und unterhalb derselben zurück (Fig. 102), so wirkt der Strom auf beiden Seiten der Nadel im gleichen Sinne; die Nadel wird also stärker abgelenkt. Die Ablenkung wird wesentlich grösser, wenn man den Kupferdraht, der durch Umspinnen mit Seide oder Baumwolle isoliert ist, auf eine Spule wickelt, innerhalb deren die Nadel sich frei so bewegen kann, dass sie sich parallel mit den Drahtwindungen einstellt, wenn durch diese kein Strom fliesst.

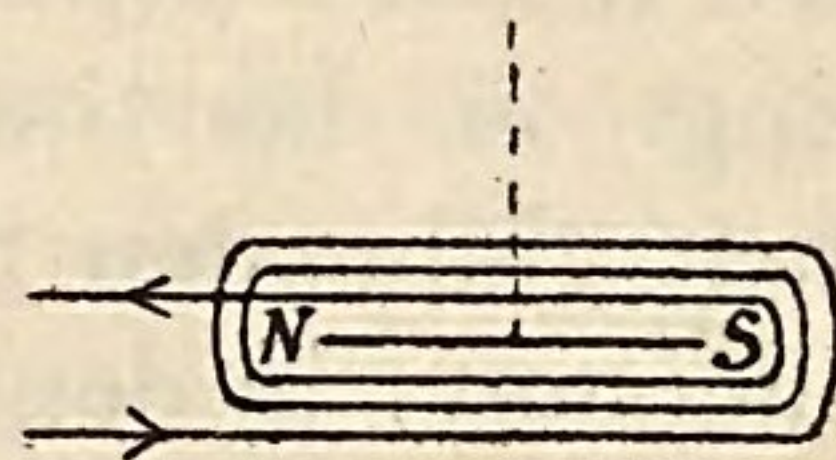


Fig. 102.

Ein Instrument, welches aus einer Magnetnadel besteht, die von vielen ihrer Achse parallelen Windungen eines Drahtes umgeben ist, heisst ein Galvanometer; man kann mit Hilfe desselben zunächst das Vorhandensein elektrischer Ströme nachweisen und ihre Richtung angeben. (Siehe auch 107.)

Bei feineren Instrumenten ist statt einer Magnetnadel ein astatisches Nadelpaar (99) so angebracht, dass sich die eine Nadel innerhalb, die andere ausserhalb der Drahtwindungen befindet.

Bei Galvanometern, welche für einen grösseren Zuhörerkreis bestimmt sind, ist mit dem um eine horizontale Achse innerhalb horizontal liegender Drahtwindungen schwingenden Magneten ein Zeiger fest verbunden, mittelst dessen sich Richtung und Grösse der Ablenkung an einem Kreisbogen ablesen lassen.

c) Chemische Wirkungen.

Elektrolyse. Galvanoplastik. Accumulatoren.

Versuch. Durch den Boden *B* eines trichterförmigen Glasgefässes (Fig. 103) sind zwei Drähte *D, D'* geführt, welche innerhalb des Gefässes in zwei Platinblättchen *A, K* endigen; das Gefäss wird mit angesäuertem Wasser gefüllt und in dasselbe zwei ebenfalls mit Wasser gefüllte Glaskölbchen *C, C'* so eingehängt, dass sich in jedem derselben eines der Platinblättchen befindet. Verbindet man nun die beiden Drähte mit den Polen einer Batterie, so tritt an jedem der beiden Blätt-

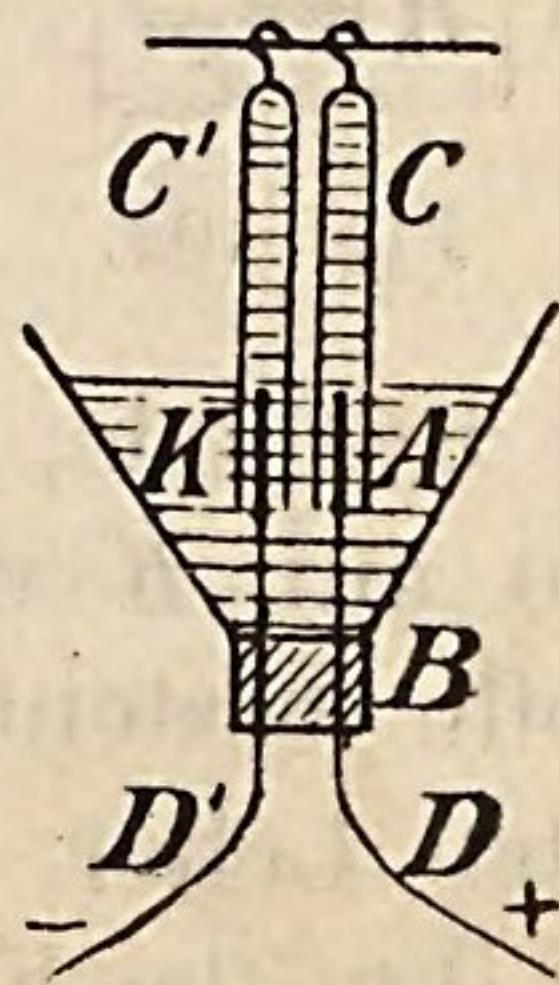


Fig. 103.

chen, den sogenannten Elektroden, eine lebhafte Gasentwicklung ein. Die Gase sammeln sich in den Kölbchen oben an; am Platinblättchen *A*, an welchem der positive Strom eintritt, an der Anode, bildet sich stets halb so viel Gas als an dem negativen Platinblättchen *K*, der Kathode. Nimmt man die Kölbchen behutsam ab und bringt in das Gas, welches sich an der Anode entwickelt hat, einen glühenden Span, so leuchtet dieser hell auf; das Gas ist Sauerstoff; in dem Gase der Kathode dagegen erlischt der Span, das Gas aber verbrennt schwach leuchtend; es ist Wasserstoff.

Stülpt man über die beiden Elektroden ein Glasgefäß und leitet die Gase in ein mit Seifenwasser gefülltes Schälchen, so entstehen Seifenblasen, welche bei Annäherung eines brennenden Spanes unter heftigem Knalle zerplatzen; Sauerstoff und Wasserstoff haben sich zu einem Gasgemische, dem Knallgase, vereinigt.

In ähnlicher Weise lassen sich metallhaltige Lösungen in ihre Bestandteile zerlegen; das Metall schlägt sich stets an der Kathode, also am negativen Pole nieder.

Der elektrische Strom wirkt also auf chemisch verbundene Stoffe zersetzend ein; man nennt diesen Vorgang Elektrolyse. Gegenstände lassen sich auf elektrolytischem Wege mit einem Metallüberzuge versehen (Vernickeln, Versilbern, Vergolden); hat dieser eine entsprechende Dicke erreicht, so lässt er sich abheben und liefert dann einen getreuen Abdruck des Gegenstandes. (Galvanoplastik.)

Ein galvanoplastischer Apparat hat in seiner einfachsten Gestalt eine ähnliche Einrichtung wie ein galvanisches Element;

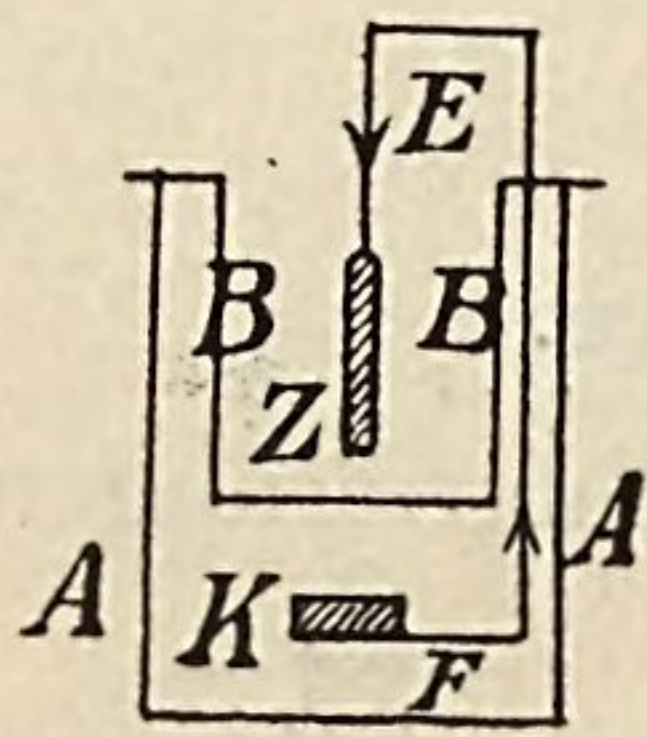


Fig. 104.

in eine Lösung von Kupfervitriol, welche sich in einem Glasgefäße *A* (Fig. 104) befindet, ist ein mit verdünnter Schwefelsäure gefüllter Thoncylinder *B* getaucht; in der Schwefelsäure hängt eine Zinkplatte *Z*, welche durch einen am Thoncylinder vorüberführenden Draht *EF* mit einem im Kupfervitriole befindlichen Kupferstück *K* leitend verbunden ist. Die Kupferplatte bildet die Kathode, weil der Strom von ihr weg zum Zink geht; wird also auf *K* ein Gegenstand gelegt, der aus einem leitenden Stoffe besteht oder wenigstens an seiner Oberfläche mit einem guten Leiter, gewöhnlich Graphit, überzogen ist, so schlägt sich auf ihm das Kupfer nieder. Um plastische Abdrücke aus anderen Metallen zu erhalten, nimmt man statt des Kupfers im Kupfer-

vitriole eine Platte aus dem betreffenden Metalle in einer Salzlösung desselben Metalles.

Versuch. Lässt man den elektrischen Strom einer Batterie längere Zeit durch den oben beschriebenen Wasserzersetzungsgapparat gehen, unterbricht dann denselben und verbindet die beiden Elektroden mit einem Galvanometer, so zeigt dieses das Vorhandensein eines elektrischen Stromes an, dessen Richtung aber der des Batteriestromes entgegengesetzt ist.

Metallplatten, welche bei Elektrolysen als Elektroden gedient haben, erzeugen, in eine geeignete Flüssigkeit gebracht, wieder einen elektrischen Strom, dessen Richtung aber der des elektrolytischen Stromes entgegengesetzt ist; man nennt solche Platten polarisiert und den durch dieselben entstehenden Strom den Polarisationsstrom.

Die Polarisation verursacht namentlich der auf der Kathode sich ausscheidende Wasserstoff.

Mit polarisierten Platten lassen sich Elemente und Batterien bilden; als besonders vorteilhaft haben sich Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure erwiesen; sie geben die ihnen zugeführte Elektrizität in Form eines kräftigen, ziemlich lange anhaltenden Polarisationsstromes wieder ab. Derartige Elemente nennt man Accumulatoren, weil sich mit Hilfe derselben gleichsam Elektrizität für späteren Gebrauch ansammeln lässt.

Die Polarisation tritt auch im Inneren eines jeden galvanischen Elementes auf; sie wirkt schwächend auf den von ihnen erzeugten Strom. Bei den sogenannten konstanten Elementen (105) ist die Polarisation möglichst vermieden, namentlich dadurch, dass sich das Kupfer bzw. die Kohle, welche die Kathode bilden, in einer Lösung befinden, in der die Bildung von freiem Wasserstoffe verhindert wird.

d) Physiologische Wirkungen.

Versuch. Hält man je einen von zwei Metallcylindern, welche mit dem Pole einer galvanischen Batterie verbunden sind, in jeder Hand, so verspürt man jedesmal, wenn der Strom geschlossen oder geöffnet wird, ein Zucken in den Muskeln der Arme; die Wirkung ist beim Öffnen des Stromes empfindlicher als beim Schliessen desselben.

107. Mass der Stromstärke. Das Ohmsche Gesetz. Elektromagnetische Masseinheiten.

Unter den Wirkungen, welche ein elektrischer Strom erzeugt, gibt es solche, welche ohne Zweifel nur von seiner Stärke, das heisst von der Elektrizitätsmenge abhängen, die in einer Sekunde den Querschnitt eines Leiters durchfliesst; zu diesen Wirkungen gehört die Erzeugung von Knallgas in einem Wasserzersetzungsgalvanometer, welchen man deshalb ein Voltmeter nennt, sowie die Ablenkung der Nadel eines Galvanometers.

Die Knallgasmenge, welche ein elektrischer Strom in einer Sekunde entwickelt, oder die Tangente des Winkels, um welchen die Magnetnadel eines Galvanometers durch einen parallel mit ihrer Achse fliessenden Strom abgelenkt wird, ist ein Mass für die Stromstärke.

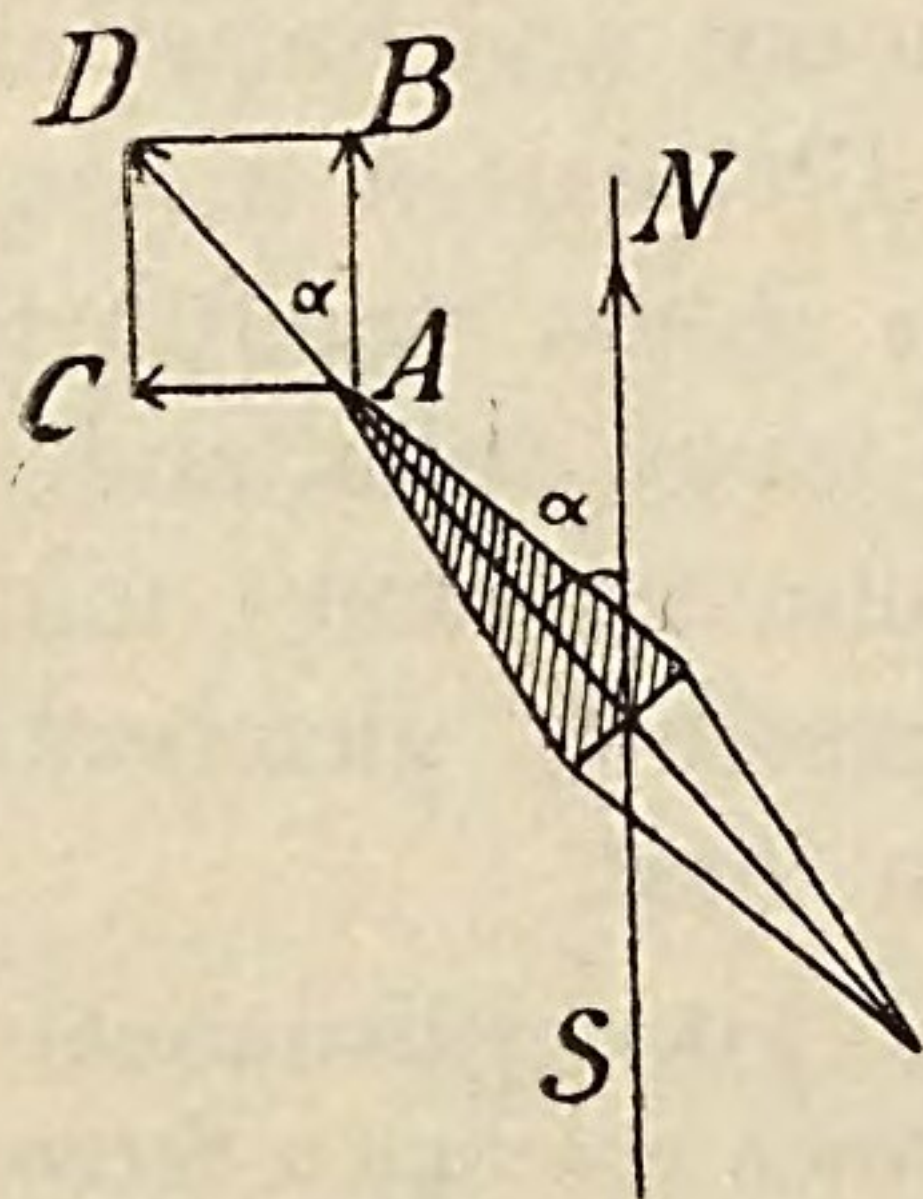


Fig. 105.

Auf den Nordpol A (Fig. 105) einer horizontal schwingenden Magnetnadel, über welcher ein Strom von Süden nach Norden fließt, wirkt nämlich einerseits die horizontale Komponente AB des Erdmagnetismus (99) in der Richtung von Süd nach Nord, andererseits senkrecht zu dieser Richtung die ablenkende Kraft AC des elektrischen Stromes (106); die Nadel muss sich also in der Richtung der Diagonale dieser beiden Kräfte einstellen; nun ist $AC = BD = AB \tan \alpha$; da aber AB unveränderlich ist, so ist $\tan \alpha$ ein Mass für AC .

Das Gleiche gilt auch für eine in lot-rechter Ebene bewegliche Nadel, für welche AB die vertikale Komponente des Erdmagnetismus darstellt.

Versuche. Man beobachte die Ablenkungswinkel, welche ein Daniellsches, ein Bunsen- oder ein anderes Element am nämlichen Galvanometer erzeugt; sie sind ungleich gross. Je mehr Elemente den Strom erzeugen, desto grösser wird der Ablenkungswinkel. Schaltet man zwischen einem Elemente und dem Galvanometer einen Leitungsdraht ein, so wird der Winkel um so kleiner, je länger der Draht, je dünner er ist; Drähte aus verschiedenen Metallen erzeugen unter sonst gleichen Umständen ungleiche Ablenkungen der Magnetnadel.

Die Stromstärke ist also um so grösser, je grösser die elektromotorische Kraft der stromerzeugenden Elemente (105) und je kleiner

der Widerstand ist, welchen der Strom zu überwinden hat. Genauere Messungen zeigen, dass zwischen der Stärke J eines galvanischen Stromes, der elektromotorischen Kraft E , welche ihn erzeugt und dem Gesamtwiderstande W , den er zu überwinden hat, die Gleichung besteht

$$J = E : W. \quad (\text{Ohmsches Gesetz.})$$

Die Stromstärke ist an allen Stellen einer geschlossenen Leitung die gleiche; denn derselbe Strom erzeugt dieselbe Ablenkung der Magnetnadel, an welcher Stelle des Leiters das Galvanometer auch eingeschaltet sein mag.

Die elektromotorische Kraft eines bestimmten Elementes ist erfahrungsgemäss von der Grösse seiner Metallplatten, sowie von der Konzentration seiner Flüssigkeit unabhängig.

Der Widerstand eines bestimmten Leitungsdrahtes ist proportional seiner Länge und umgekehrt proportional seinem Querschnitte; setzt man den Widerstand, welchen ein beliebiger Kupferdraht erzeugt, gleich 1, so beträgt der Widerstand eines gleich langen, gleich starken Drahtes von Silber 0,9, von Zink 3,5, von Eisen 6,1, von Blei 12,3; Quecksilber leistet 59 mal, Gaskohle 2000 mal grösseren Widerstand als Kupfer. Den reziproken Wert des spezifischen Leitungswiderstandes eines Stoffes nennt man seine Leitungsfähigkeit.

Bemerkung. Die Drahtwindungen eines Galvanometers vervielfältigen zwar einerseits die Wirkung des Stromes auf die Nadel, schwächen ihn aber andererseits durch ihren Leitungswiderstand; man wendet deshalb nur für sehr schwache Ströme viele, dünne Drahtwindungen an; bei stärkeren Strömen führt man dickeren Draht in weniger Windungen um die Nadel.

Zusatz. Der Widerstand eines geschlossenen Stromkreises besteht aus zwei Teilen, dem inneren Widerstande des Elementes oder der Batterie, und dem äusseren Widerstande des Leitungsdrahtes.

Werden also n gleiche Elemente, von denen jedes die elektromotorische Kraft E besitzt und den inneren Widerstand W_i hat, hinter einander geschaltet, so ist bei einem äusseren Widerstande W_a die Stromstärke

$$J = n \cdot E : (W_a + n \cdot W_i);$$

wird W_a im Vergleiche zu W_i sehr gross, so ist nahezu

$$J = n \cdot E : W_a.$$

Neben einander geschaltete Elemente stellen ein grosses Element dar; ihre gesamte elektromotorische Kraft ist also nach Obigem nicht grösser als die eines einzelnen Elementes; aber der innere Widerstand nimmt proportional der Zahl der Elemente ab; in diesem Falle ist also

$$J = E : (W_a + W_i : n)$$

und falls W_a gegen W_i sehr klein ist, näherungsweise

$$J = n \cdot E : W_i.$$

Ist also der äussere Widerstand sehr gross, so muss man die Elemente hintereinander, ist er sehr klein, neben einander schalten.

Um die bei einem elektrischen Strome in Betracht kommenden Grössen zu messen, hat man folgende Masseinheiten festgesetzt.

Einheit der Stromstärke ist der zehnte Teil desjenigen Stromes, welcher in einem Leiter von der Länge 1 cm vorhanden sein muss, um auf den Magnetismus 1 (98) in der Entfernung 1 cm mit der Kraft einer Dyne zu wirken; man nennt sie 1 Ampère.

Das Produkt aus der elektromotorischen Kraft in die Stromstärke nennt man die Arbeit des Stromes; die Masseinheit der Stromarbeit setzt man gleich 10^7 Erg (77) und nennt sie 1 Watt.

Einheit der elektromotorischen Kraft ist dann diejenige, welche bei einer Stromstärke von 1 Ampère eine Arbeit von 1 Watt leistet; man nennt sie 1 Volt.

Widerstandseinheit ist endlich dem Ohmschen Gesetze gemäss derjenige Widerstand, bei welchem die elektromotorische Kraft von 1 Volt eine Stromstärke von 1 Ampère erzeugt; man nennt sie 1 Ohm.

Es ist also $1 \text{ Watt} = 1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampère}$ und
 $1 \text{ Ohm} = 1 \text{ Volt} : 1 \text{ Ampère}.$

1 Ampère liefert in einer Sekunde 0,174 ccm Knallgas; 1 Volt ist etwa so gross wie 0,9 von der elektromotorischen Kraft eines Daniellschen Elementes; 1 Ohm Widerstand leistet ein Quecksilberfaden von 1,06 m Länge und 1 qmm Querschnitt.

108. Voltaelektrische und magnetelektrische Induktion.

Versuche. Eine Holzspule *A* (Fig. 106), auf welcher etwas dickerer Kupferdraht in nicht zu vielen Windungen aufgewickelt

ist, lässt sich in eine Holzspule *B*, auf der sich sehr viele Windungen sehr dünnen Kupferdrahtes befinden, hineinschieben.

Verbindet man die Drahtenden der Spule *A*, der sogenannten primären Spule, mit den Polen eines galvanischen Elementes, die der Spule *B*, der sekundären Spule, mit einem Galvanometer und schiebt *A* in *B* hinein, so schlägt die Nadel des Galvanometers aus und zwar in der Richtung, welche der eines galvanischen Stromes entgegengesetzt ist; zieht man die primäre

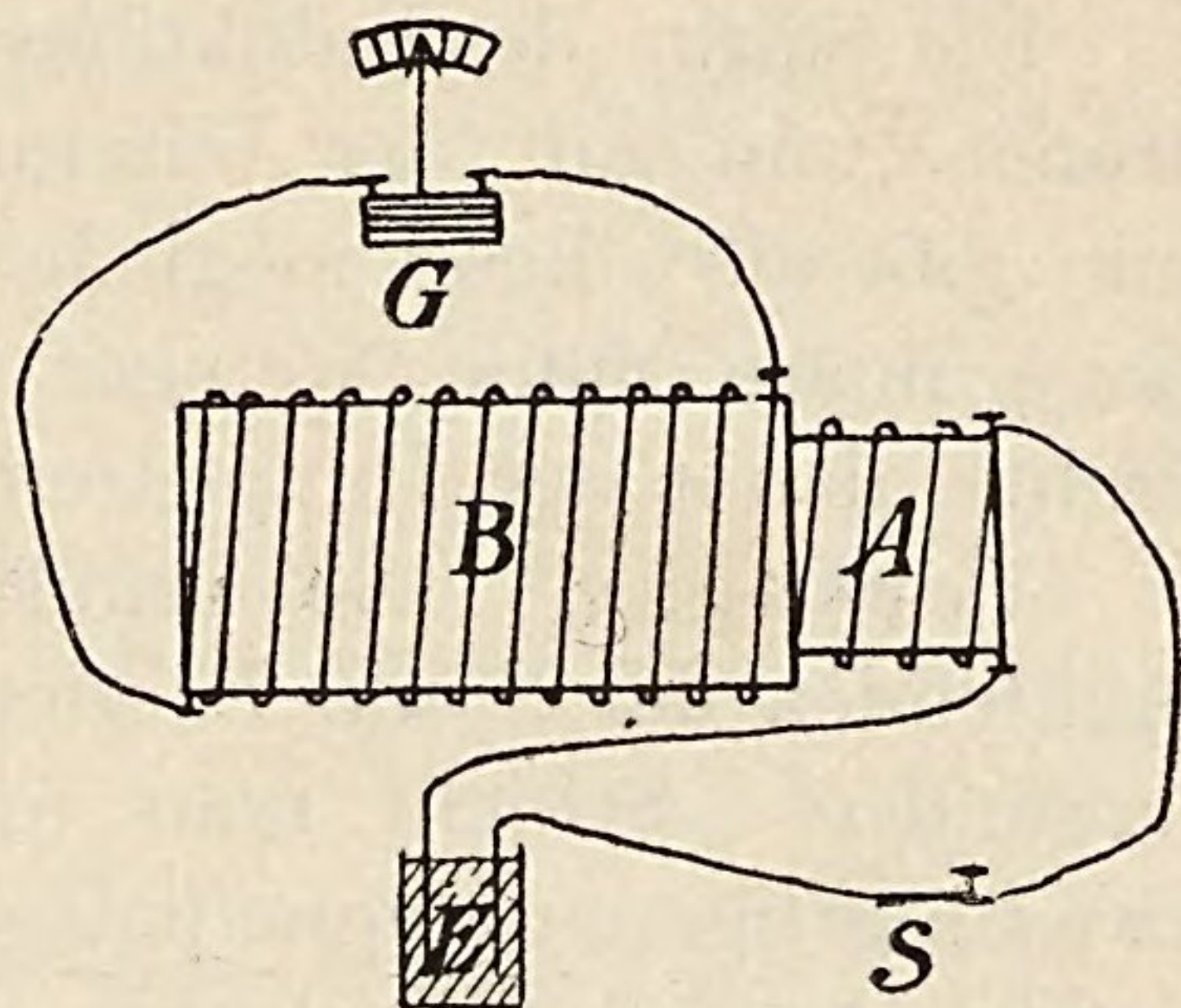


Fig. 106.

Spule aus der sekundären wieder heraus, so wird die Galvanometernadel wieder abgelenkt, dieses Mal aber im Sinne des galvanischen Stromes; lässt man die primäre Spule nach irgend einer Verschiebung ruhig liegen, so kehrt die Nadel in ihre Gleichgewichtslage zurück.

Ebenso erfährt die Nadel des Galvanometers einen Ausschlag, wenn der Batteriestrom mittelst des Stromschlüssels *S* geschlossen oder geöffnet wird, während sich die primäre Spule innerhalb der sekundären befindet und zwar bei Stromschluss im entgegengesetzten, bei Stromöffnung im gleichen Sinne wie bei einem galvanischen Strome; solange aber der Batteriestrom geschlossen oder geöffnet ist, bleibt die Galvanometernadel in Ruhe.

In einem geschlossenen Leiter entsteht jedesmal ein momentaner elektrischer Strom, wenn in seiner Nähe ein elektrischer Strom entsteht oder vergeht, sowie wenn ein geschlossener elektrischer Strom nahe bei demselben bewegt wird. Man nennt diese Erscheinung Volta-Induktion; der in dem Leiter entstehende Strom heisst der induzierte oder Induktionsstrom, während der ihn hervorruufende Batteriestrom der induzierende oder Hauptstrom heisst.

Der Induktionsstrom, welcher bei Stromschluss oder Annäherung des Hauptstromes entsteht, hat die entgegengesetzte Richtung des letzteren; dagegen ist der durch Stromöffnung oder Entfernung des Hauptstromes entstehende induzierte Strom dem Hauptstrome gleich gerichtet.

Jede Änderung in der Stärke eines elektrischen Stromes ruft in benachbarten geschlossenen Leitern Induktionsströme hervor.

Die Stärke des Induktionsstromes wächst mit der des Hauptstromes und mit der Windungszahl in der sekundären Spule; man gibt also dieser möglichst viele Windungen; dagegen erhält die primäre Spule weniger Windungen von etwas dickerem Drahte, damit der Hauptstrom nicht zu sehr an Stärke verliert.

Versuche. Die primäre Spule *A* werde entfernt, die Drahtenden der Spule *B* seien wieder mit einem Galvanometer verbunden. Schiebt man nun in letztere Spule rasch einen etwas kräftigeren Magnetpol ein, so wird die Nadel des Galvanometers ebenfalls abgelenkt; zieht man den Magnetpol aus der Spule heraus, so erfährt die Nadel eine zweite Ablenkung, aber im entgegengesetzten Sinne wie beim Einschieben des Magnetpoles.

Die Richtung, in welcher die Nadel des Galvanometers durch die Bewegung des Nordpoles eines Magneten in der Drahtspule abgelenkt wird, ist derjenigen entgegengesetzt, welche sich bei der entsprechenden Bewegung seines Südpoles ergibt. Lässt man den Magneten in der Drahtspule irgendwie ruhig liegen, so zeigt die Galvanometernadel keinen Ausschlag.

Legt man in die Spule *B* einen Stab von weichem Eisen und magnetisiert diesen, sei es durch Annäherung eines kräftigen Magneten, sei es dadurch, dass man über den Stab an seinem anderen Ende die Spule *A* schiebt und durch diese elektrische Ströme schickt, so schlägt die Nadel des Galvanometers in dem einen Sinne aus; wird der Eisenstab durch Entfernung des Magneten von demselben oder durch Unterbrechung der Ströme in der Spule *A* entmagnetisiert, so wird die Galvanometernadel im entgegengesetzten Sinne abgelenkt; solange der Eisenstab magnetisch oder unmagnetisch ist, bleibt die Nadel in ihrer Gleichgewichtslage.

In einem geschlossenen Leiter entsteht jedesmal ein momentaner, elektrischer Strom, wenn in seiner Nähe Magnetismus entsteht oder vergeht, sowie wenn ein Magnetpol nahe bei demselben bewegt wird. Man nennt diese Erscheinung Magnet-Induktion.

Die Richtung der durch Magnetismus erzeugten Induktionsströme entspricht vollständig denen der Voltainduktion, wenn man sich einen Magneten als einen von elektrischen Strömen umgebenen Körper vorstellt (106 b).

Annäherung eines Magneten entspricht einem Stromschlusse, Entfernung eines solchen einer Stromöffnung.

Jede Änderung in der Stärke eines Magnetpoles ruft in benachbarten, geschlossenen Leitern Induktionsströme hervor.

Die Induktionsströme, welche in der sekundären Spule *B* durch den Hauptstrom der primären Spule *A* entstehen, werden wesentlich stärker, wenn man in letztere ein Bündel von Eisendrähten schiebt; in denselben entsteht nämlich beim Schliessen und Öffnen des Hauptstromes vorübergehend Magnetismus (106b) und dieser erzeugt bei seinem Entstehen und Vergehen in der sekundären Spule ebenfalls Induktionsströme und zwar im nämlichen Sinne wie der Hauptstrom selbst.

Die verstärkende Wirkung der Eisendrähte wird aber teilweise oder ganz aufgehoben, wenn man dieselben innerhalb der Spule *A* mit einer geschlossenen Messinghülse zum Teile oder vollständig bedeckt, weil sich in dieser Hülse Induktionsströme ausbilden, welche zwar ebenfalls induzierend auf die Spule *B* und magnetisierend auf die Eisendrähte wirken, aber im entgegengesetzten Sinne des Hauptstromes.

Sollen Induktionsströme in rascher Aufeinanderfolge entstehen, so muss der Hauptstrom ebenso rasch nach einander geschlossen und wieder geöffnet werden; dies geschieht mittelst des sogenannten Wagnerschen Hammers; auf einer metallenen Säule *CD* (Fig. 107) ist eine Stahlfeder *DF* befestigt, welche eine metallene Spitze *S* berührt und an ihrem Ende ein eisernes Plättchen *F* trägt; dieses steht einem kleinen Elektromagneten *MN* gegenüber. Der eine Pol der Batterie *E* ist mit der Säule *CD* leitend verbunden, vom anderen geht eine Drahtleitung zum Elektromagneten *MN*, von diesem zur primären Spule *A* und von letzterer an die Spitze *S*. Wird nun der Strom geschlossen, so zieht der Elektromagnet den Anker *F* an; dadurch wird aber die Feder *DF* von der Spitze *S* entfernt, der Strom ist also geöffnet; infolgedessen wird der Anker *F* wieder frei, die Feder

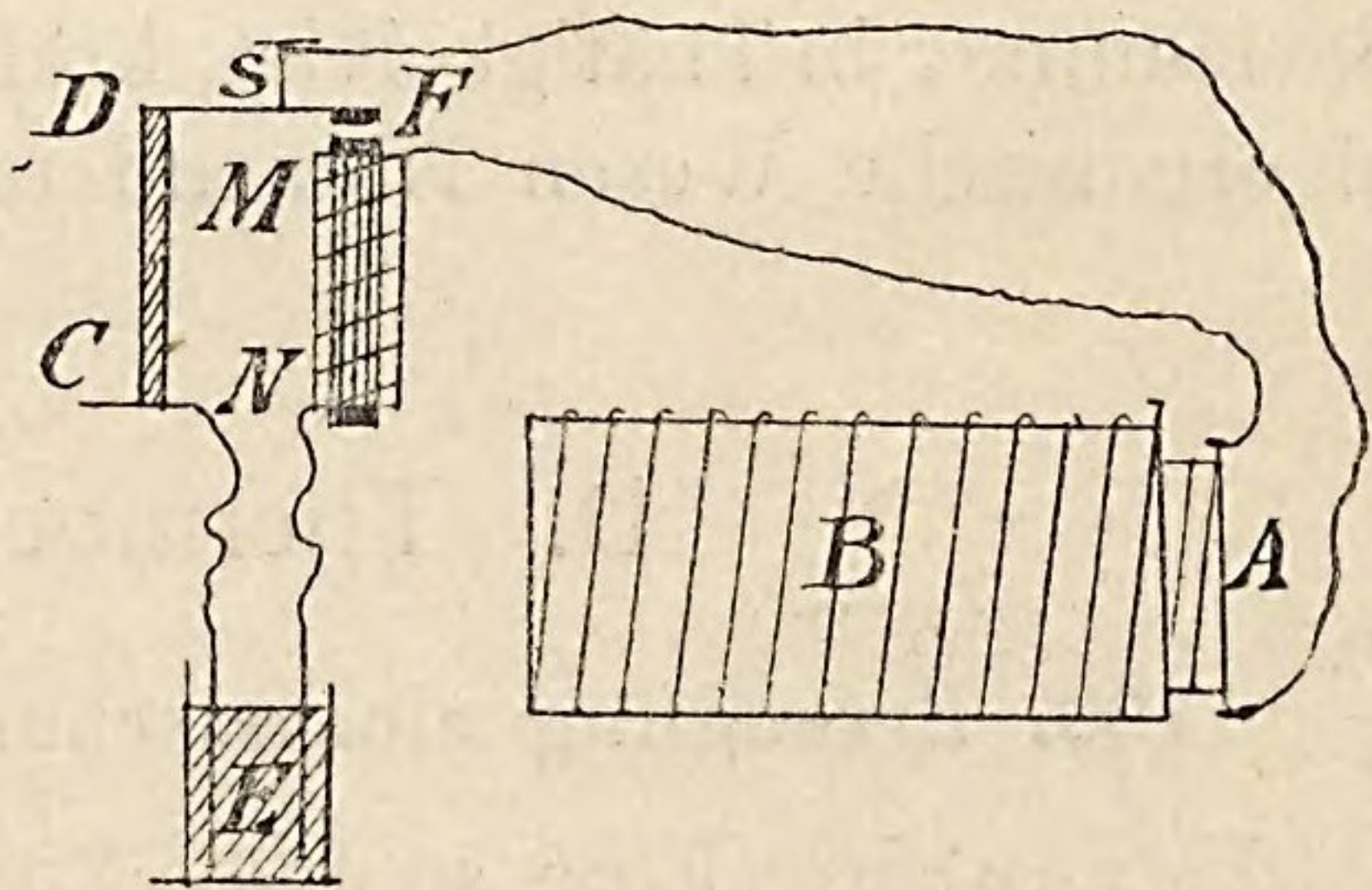


Fig. 107.

schwingt zurück und berührt wieder die Spitze *S*; es entsteht neuerdings Stromschluss u. s. w.

Die Induktionsströme besitzen eine hohe Spannung; deshalb lassen sich mit ihnen ähnliche Wirkungen hervorbringen wie mit den Strömen der Reibungs- oder Influenzelektrisiermaschine.

Sind die Drahtenden der sekundären Spule eines kräftigen Induktionsapparates nicht verbunden, so lassen sich aus einem jeden der beiden Drähte elektrische Funken ziehen; werden die Drahtspitzen einander genähert, so springen Funken über.

In Geisslerschen Röhren (103) zeigen sich bei mässiger Verdünnung des Gases die nämlichen Lichterscheinungen wie beim Entladungsschlage einer Influenzmaschine; ist aber das Gas in denselben sehr stark verdünnt, so geht der Lichtstrom nicht mehr von einer Elektrode zur anderen, sondern von der negativen Kathode aus geradlinig fort; die Stelle der Glaswand, an welcher diese sogenannten *Kathodenstrahlen* auffallen, sendet dem Auge nicht wahrnehmbare Lichtstrahlen aus, welche viele undurchsichtige Körper ohne Brechung und Reflexion durchdringen und infolgedessen auf leicht empfindlichen Platten photographische Schattenbilder des Inneren undurchsichtiger Körper erzeugen. (*Röntgenstrahlen*.)

Hält man zwei Metallhülsen, welche mit den Drähten der sekundären Spule verbunden sind, in den Händen, so empfindet man heftige Zuckungen in den Armmuskeln, solange der Wagnersche Hammer in Thätigkeit ist; kräftigere Induktionsströme wirken auf organische Wesen lähmend und tötend.

D. Thermoelektrizität.

109. Erzeugung elektrischer Ströme durch Wärme.

Versuch. Eine schmale Zinkplatte und ein mehrfach gebogener Kupferstreifen sind so an einander befestigt, dass sie sich an ihren Enden gut berühren, zwischen denselben aber einen rechteckigen Raum frei lassen; in diesem Raume kann eine Magnetnadel horizontal frei schwingen.

Stellt man nun diesen Metallbügel so, dass seine Längsachse mit der Süd-Nordrichtung der Magnetnadel zusammenfällt und erwärmt die eine Verbindungsstelle der beiden Metalle, so wird die Magnetnadel abgelenkt; ihr Nordpol weicht nach Westen

oder nach Osten aus, je nachdem die vor dem Süd- oder vor dem Nordpole der Nadel befindliche Berührungsstelle der beiden Metalle erwärmt wird. Die Nadel wird um so mehr abgelenkt, je stärker die Metalle erwärmt werden; bei Abkühlung der Metalle bewegt sich die Nadel im umgekehrten Sinne wie bei Erwärmung derselben.

Andere Metalle verursachen bald stärkere, bald schwächere Ablenkungen der Nadel, teils im selben, teils im entgegengesetzten Sinne wie Kupfer und Zink; am wirksamsten sind Wismut und Antimon.

Haben die Berührungsstellen zweier verschiedenen Metalle ungleiche Temperatur, so entsteht in denselben ein elektrischer Strom; man bezeichnet denselben als thermoelektrisch. Die Stärke und Richtung eines thermoelektrischen Stromes hängt von der Temperaturdifferenz der Berührungsstellen der Metalle, aber auch von der Natur der letzteren ab.

Viele rechtwinklig gebogene Stäbchen aus zwei Metallen, welche so verbunden sind, dass die Berührungsstellen von ungerader Ordnungszahl nach einer Seite, die übrigen nach der entgegengesetzten Seite liegen, bilden eine Thermosäule; diese ist, da sie bei der geringsten Temperaturdifferenz ihrer beiden Seiten an einem Galvanometer einen elektrischen Strom anzeigt, das empfindlichste Thermometer.

E. Technische Verwendung elektrischer Ströme. Stromerzeugungsmaschinen.

110. Die elektrische Klingel.

Die elektrische Klingel hat dieselbe Einrichtung wie der Wagnersche Hammer (108) und wird wie dieser durch einen galvanischen Strom in Bewegung gesetzt; mit der Feder *DF* (Fig. 107) ist ein Hämmerchen fest verbunden und diesem gegenüber eine Glocke angebracht; wird der Strom geschlossen, so läutet die Glocke infolge der hin und her schwingenden Bewegung der Feder; ist der Strom geöffnet, so gibt die Glocke keinen Ton.

Öffnung und Schluss des Stromes wird mittelst des Tasters bewirkt; dieser besteht aus zwei Metallplättchen, welche je mit den Enden des an einer Stelle unterbrochenen Leitungsdrahtes ver-

bunden sind und durch eine isoliert angebrachte Feder von einander gehalten werden, solange der Strom geöffnet sein soll; um den Strom zu schliessen, drückt man das eine Plättchen an das andere.

111. Der elektrische Telegraph.

Die Ablenkung der Magnethadel durch einen elektrischen Strom oder die Magnetisierung weichen Eisens durch denselben wird benützt, um auf weite Entfernungen hin Zeichen zu geben; jede Vorrichtung, welche diesem Zwecke dient und auf den Eigenschaften des galvanischen Stromes beruht, heisst ein elektrischer Telegraph. Die wesentlichen Bestandteile desselben sind: eine galvanische Batterie, eine Hin- und Rückleitung des Stromes, ein Zeichengeber und ein Zeichenempfänger.

Die Batterie befindet sich in der Aufgabestation; von dieser führt der Leitungsdraht, entweder oberirdisch an Stangen mittelst isolierenden Porzellanhütchen befestigt oder unterirdisch seiner ganzen Länge nach mit einer isolierenden Hülle umgeben (Kabel), zur Empfangsstation. Ein Rückleitungsdraht ist entbehrlich; man versenkt in beiden Stationen Metallplatten in die Erde und verbindet mit der Platte der Aufgabestation den negativen Batteriepole und mit der Platte der Empfangsstation den Zeichenempfänger; dadurch werden die Elektrizitäten der beiden Pole so abgeleitet, dass der Strom wie in einem geschlossenen Leiter entsteht.

Bei dem am häufigsten gebrauchten Morseschen Druck-

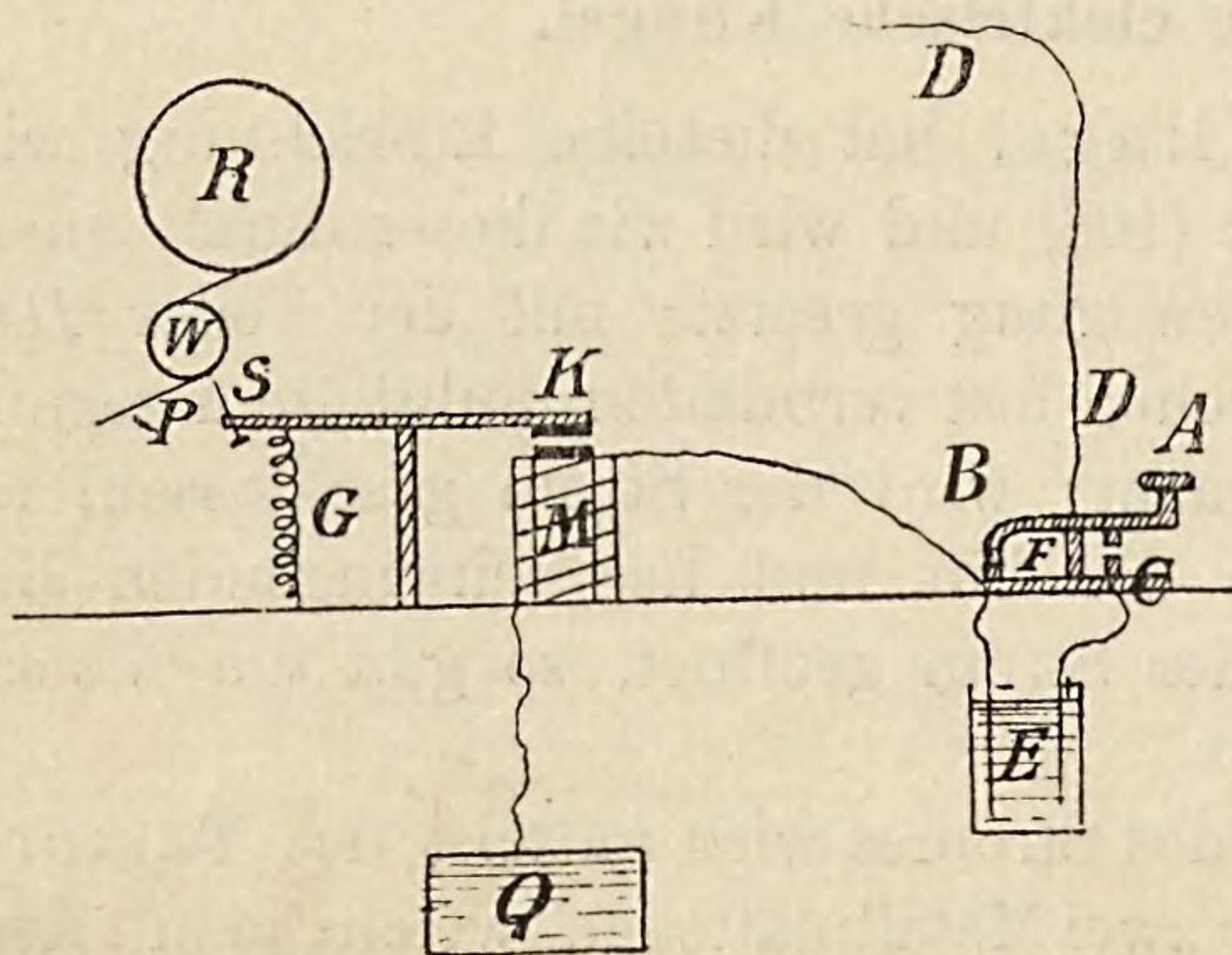


Fig. 108.

Hebel AB (Fig. 108), von dem die Drahtleitung DD an die andere Station geht und einem Knopfe C , der mit dem positiven Pole der Batterie E in Verbindung steht. Die Feder F verhindert eine Berührung von Knopf und Hebel, sie hält also den Strom geöffnet; geschlossen ist

derselbe nur solange, als der Hebel AB durch einen Druck mit dem Knopfe C in Berührung gebracht wird.

Der Zeichenempfänger ist beim Morseschen Apparate ein Elektromagnet M , dessen Anker K bei Stromschluss den Stift S gegen einen Papierstreifen P drückt, bei Stromöffnung aber durch eine Feder G wieder losgerissen wird. Kurzer Stromschluss erzeugt einen Punkt, längerer einen Strich. Für die Buchstaben des Alphabets hat man bestimmte Zusammenstellungen von Punkten und Strichen vereinbart. Der Papierstreifen wird mittelst eines Uhrwerkes von dem Rade R abgerollt, vor dem Stifte S vorbeigeführt und durch diesen gegen eine Farbwalze W gedrückt, damit die Zeichen deutlich abgelesen werden können.

Fig. 109 zeigt schematisch den Lauf des geschlossenen Stromes, wenn von Station I nach II telegraphiert wird.

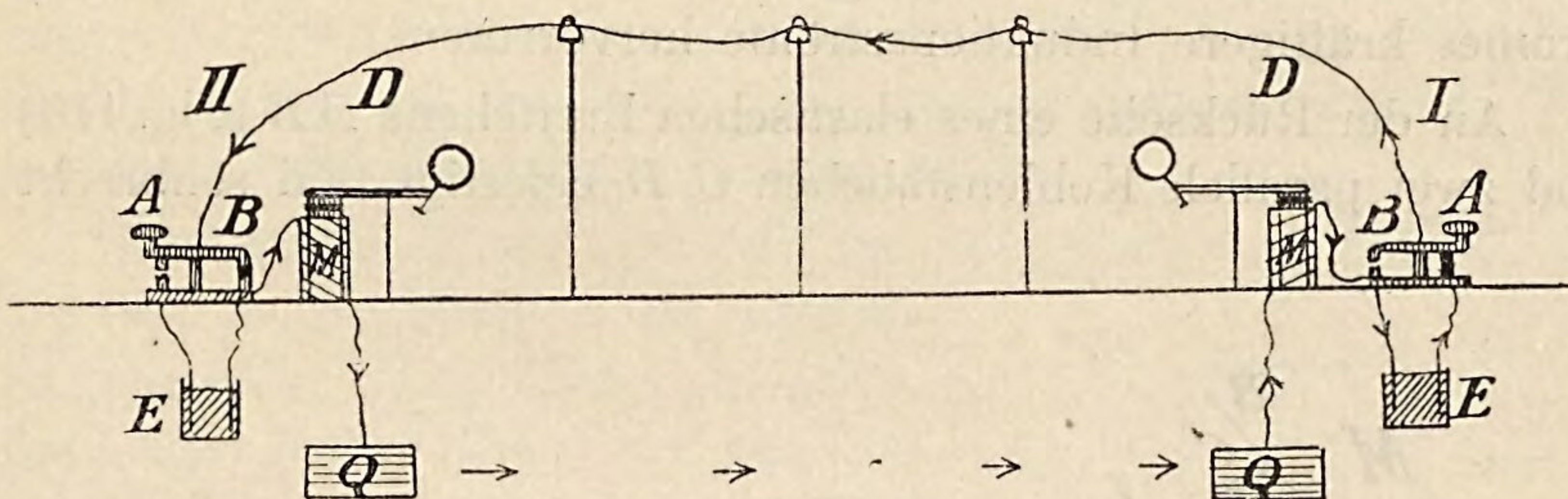


Fig. 109.

Zwischen zwei Stationen kann mittelst desselben Leitungsdrahtes in beiden Richtungen telegraphiert werden; aber jede Station muss einen Zeichengeber und einen Zeichenempfänger haben; die Batterie und der Zeichenempfänger sind in jeder Station mit derselben Metallplatte Q leitend verbunden.

112. Das Telephon und das Mikrophon.

Das Telephon ist ein Apparat, mittelst dessen laut und deutlich gesprochene Worte in grosser Entfernung gehört werden können; seine Wirkung beruht auf Magnetinduktion.

Vor dem einen Pole eines Magnetstabes S (Fig. 110) befindet sich ein dünnes Eisenplättchen PP ; derselbe Pol ist mit einer Induktionsrolle J umgeben, deren Windungen mit denen der Induktionsrolle eines zweiten ebenso konstruierten Apparates

durch Leitungsdrähte in Verbindung stehen. Spricht man nun gegen das Eisenplättchen des einen Apparates, so gerät es in Schwingungen und erzeugt durch seine wechselnde Entfernung von dem Magnetpole Änderungen im magnetischen Zustande; diese induzieren in die Windungen der den Pol umgebenden Spule elektrische Ströme, welche zur Spule des zweiten Apparates fortgeleitet werden, in diesem ebenfalls die Stärke des Magnetismus ändern und infolgedessen das dort vor dem Pole befindliche Plättchen in dieselben Schwingungen versetzen, welche das des ersten Apparates gemacht hat; diese Schwingungen werden von der Luft auf das an den zweiten Apparat gehaltene Ohr übertragen.

Dieses Telephon versagt als Sprechapparat bei weiteren Entfernungen, weil die Induktionsströme durch lange Drahtleitungen zu sehr geschwächt werden; wirksamer ist das Mikrophon, bei welchem Änderungen in der Stärke eines Batteriestromes kräftigere Induktionsströme hervorrufen.

An der Rückseite eines elastischen Brettchens AB (Fig. 110) sind zwei parallele Kohlenstäbchen C, D befestigt und senkrecht

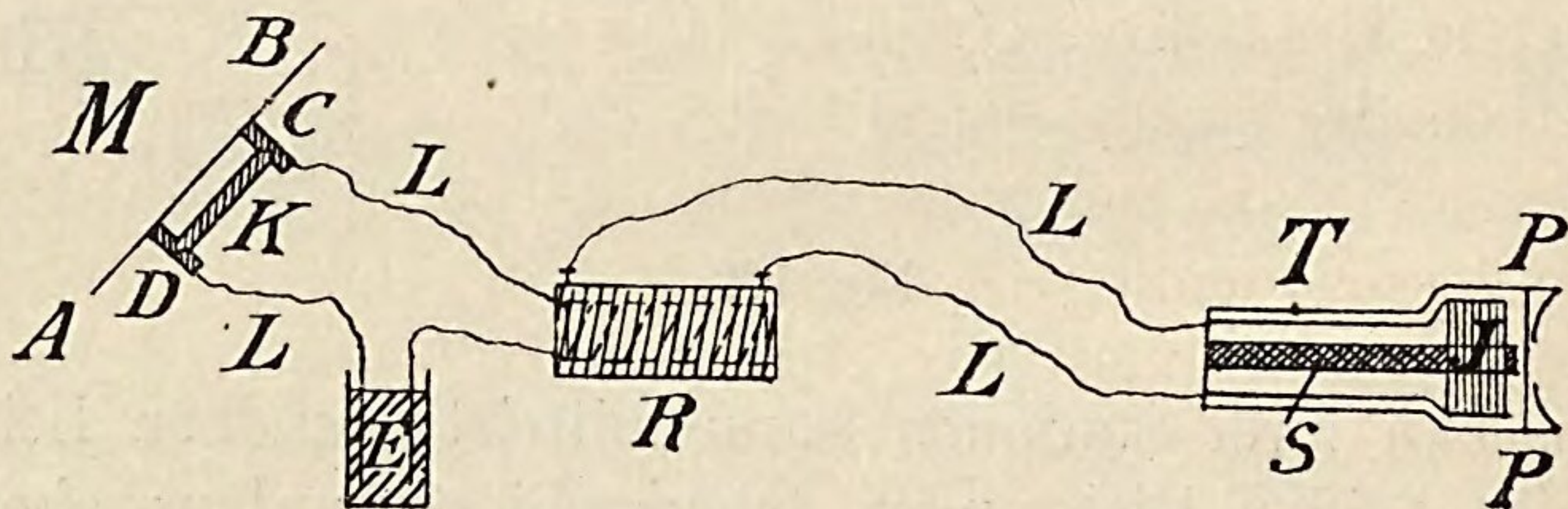


Fig. 110.

zu diesen in Höhlungen derselben mehrere ebensolche Stäbchen K ganz lose und leicht beweglich eingesetzt; von einer Batterie E führt eine Drahtleitung LL zu den Kohlenstäbchen C, D , von diesen an die Induktionsrolle J eines Telephons T und von letzterem zur Batterie zurück. Die geringste Erschütterung, welche die Kohlenstäbchen erfahren, bewirkt Änderungen im Leitungswiderstande der Kohle, also auch in der Stromstärke. Was vor dem Brettchen gesprochen wird, lässt sich an einem weit entfernten Telephone deutlich hören.

Noch wirksamer wird das Mikrophon, wenn man nicht den Batteriestrom selbst, sondern einen von demselben in einem Induktionsapparate R erzeugten sekundären Strom durch das Telephon gehen lässt.

113. Die magnetelektrischen und die dynamoelektrischen Maschinen.

Bei allen Maschinen, durch welche stärkere elektrische Ströme erzeugt werden, kommen diese dadurch zu stande, dass ein Eisenkern bei Annäherung an einen Magnetpol stärker, bei Entfernung von demselben schwächer magnetisch wird (98) und dass durch die wechselnde Stärke dieses Magnetismus in eine den Eisenkern umgebende Drahtleitung elektrische Ströme induziert werden (108).

Bei den älteren magnetelektrischen Maschinen rotiert vor den Polen eines feststehenden Magneten ein hufeisenförmig gebogener Eisenstab, auf dessen Armen leitend verbundene Induktionsspulen befestigt sind.

Entfernt sich der Arm A (Fig. 111) etwa vom Pole N , so entsteht in der Spule A , da diese Bewegung einer Stromöffnung entspricht, ein abnehmender Strom, der mit dem, von welchem man sich den Nordpol N umflossen denkt (106 b), gleich gerichtet ist (108); nähert sich A nach einer Vierteldrehung dem Südpol S , so ergibt sich in derselben Spule entsprechend einem Stromschlusse ein zunehmender, den um S kreisenden

Strömen entgegengesetzter, dem vorigen Induktionsstrom also gleich gerichteter Strom; bewegt sich aber A auf der anderen Seite der Linie NS , so wirken die Pole auf die Spule A im entgegengesetzten Sinne; der Induktionsstrom wechselt also seine Richtung, so oft der Eisenkern an den Polen des Magneten vorübergeht.

Auf gleiche Weise entstehen in der Spule B Ströme; damit sich

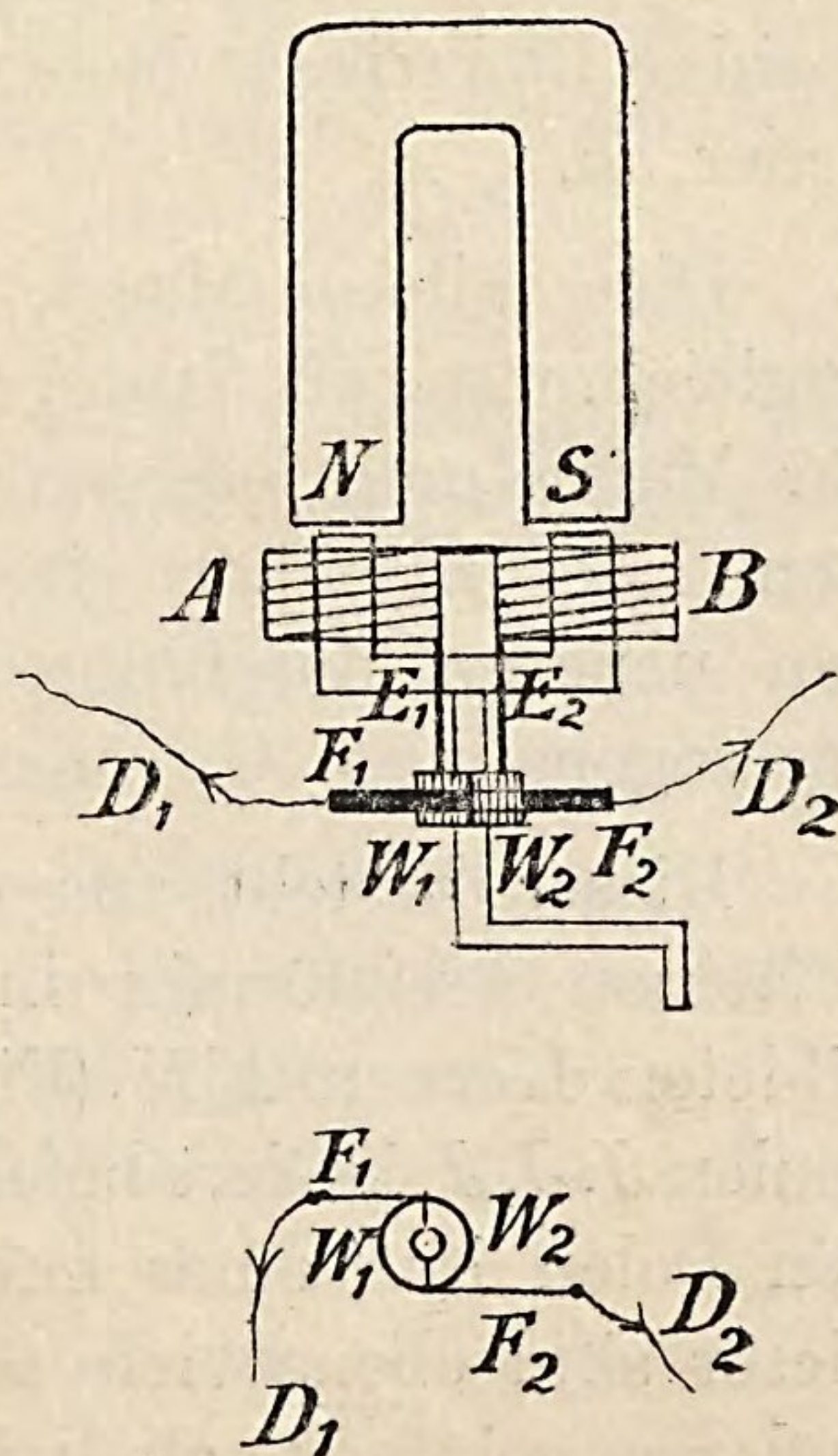


Fig. 111.

nun die in beiden Spulen gleichzeitig erzeugten Ströme in den Drähten der Spulen im gleichen Sinne fortbewegen, müssen diese (von vorne gesehen) auf der einen Spule rechts auf der anderen links gewunden sein.

Die auf diese Weise in den Spulen entstehenden (positiven) Ströme wechseln nun zwar nach jeder halben Umdrehung des Eisenkernes ihre Richtung, werden aber mit Hilfe des sogenannten Stromwenders an die äussere Drahtleitung als solche von stets gleicher Richtung abgegeben; dieser besteht in einem an der Rotationsachse isoliert aufgesetzten, aus zwei ebenfalls von einander isolierten Teilen W_1 W_2 zusammengesetzten Metallcylinder; an dem einen Teile W_1 ist das eine Ende des Spulendrahtes E_1 , an dem anderen Teile W_2 das zweite Drahtende E_2 befestigt; die beiden Teile sind also stets einander entgegengesetzt geladen, jeder für sich wird nach jeder halben Drehung des Eisenkernes abwechselnd positiv und negativ elektrisch. Zwei Federn F_1 , F_2 , an welchen die Enden des Leitungsdrahtes D_1 , D_2 befestigt sind, schleifen nun so am Stromwender, dass jede von ihnen im Augenblicke des Stromwechsels in der Maschine mit dem einen Teile des Stromwenders in Berührung kommt, den anderen aber verlässt; dadurch geben die beiden Teile die positive Elektrizität stets an die eine, die negative an die andere Feder ab.

Diese älteren Maschinen haben den Nachteil, dass sie einen ungleichmässigen Strom liefern, weil die induzierende Wirkung der Magnetpole jedesmal erst dann zur vollen Geltung kommt, wenn der Eisenkern in ihre unmittelbare Nähe gelangt; bei den neueren Maschinen ist dieser Nachteil durch Anwendung des sogenannten Grammeschen Ringes vermieden.

Dieser besteht aus einem durch eine grosse Anzahl von einzelnen kreisförmig in sich geschlossenen Eisendrähnen gebildeten Kernen KK (Fig. 112), auf welchem viele Induktionsspulen J, J, J isoliert befestigt sind; der Ring dreht sich zwischen den Polen N S eines kräftigen Magneten um eine Achse A ; an dieser sind ebensoviele Kupferplättchen P, P, P isoliert von einander angebracht, als Induktionsspulen vorhanden sind und mit jedem solchen Kupferplättchen sind die Drahtenden D, D, D je zweier aufeinander folgenden Spulen leitend verbunden; an den zwei Stellen, welche von den Magnetpolen gleich weit entfernt

sind, schleifen an der Achse zwei Federn F_1, F_2 , an denen die Leitungsdrähte L_1, L_2 festgeklemmt werden.

An den zwei Stellen des Eisenkernes, welche unmittelbar vor den Polen N, S des Magneten liegen, entstehen nun stets zwei diesen entgegengesetzte Magnetpole S_1, N_1 ; dreht sich also der Ring um seine Achse, so werden in die Spulen Ströme induziert gerade so, als ob der Eisenkern unbeweglich wäre, und aus zwei halbkreisförmigen Magneten S_1BN_1 und N_1CS_1 bestünde, die mit ihren gleichnamigen Polen an einander stiessen, die Spulen aber an diesen Magneten im Sinne der

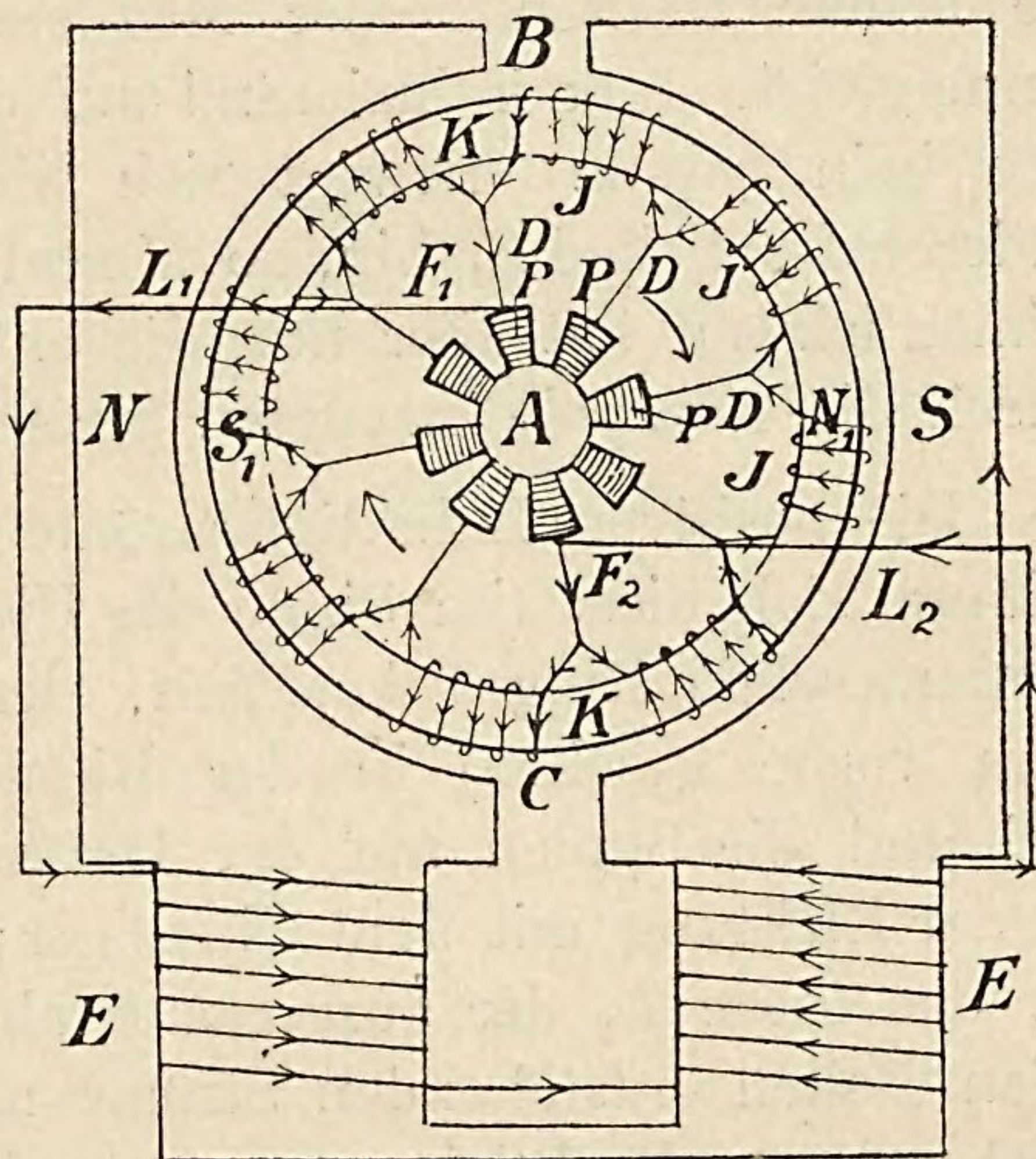


Fig. 112.

Drehungsrichtung entlang geschoben würden. Bewegt sich nun eine dieser Rollen über den einen Doppelpol z. B. N_1 hin, so wird in ihr durch den einen Magneten, von dem sie sich entfernt, ein Strom erzeugt, der entsprechend einer Stromöffnung (108) den Strömen, von welchen man sich den Magneten umflossen denkt (106 b) gleich gerichtet ist und durch den anderen Magneten, dem sie sich nähert ein solcher, der als Schliessungsstrom den Strömen des letzteren entgegengesetzt gerichtet ist, folglich, da der zweite Magnet die umgekehrte Lage des ersten hat, dieselbe Richtung hat wie der vom ersten Magneten erzeugte Strom. Bewegt sich nun die Spule weiter, so entfernt sie sich noch immer vom ersten Magneten, so dass die von diesem erzeugten Ströme ihre Richtung beibehalten, aber schwächer werden; durch den Teil des zweiten Magneten, der sich zwischen seinem Nordpol und der Spule befindet werden nun, da sie sich von diesem Teile nun gleichfalls entfernt, Induktionsströme im entgegengesetzten Sinne, durch den Teil derselben, der zwischen der Spule und dem Mittelpunkt des Magneten liegt, da sie sich diesem nähert, aber noch fortwährend Ströme vom gleichen Sinne mit den durch den ersten Magneten erzeugten Induktions-

strömen hervorgerufen. Der gesamte Induktionsstrom behält also seine Richtung bei, verliert aber an Stärke. Ist die Rolle im Mittelpunkte C des zweiten Magneten angelangt, so wirken die beiden Hälften beider Magneten je im entgegengesetzten Sinne gleich stark induzierend auf die Spulendrähte; es entsteht also kein Strom. Bewegt sich hierauf die Spule gegen den anderen Doppelpol S_1 hin, so nimmt der Induktionsstrom wieder allmählich zu, hat aber nun die entgegengesetzte Richtung des durch die Nordpole erzeugten Stromes; u. s. f.

Die (positiven) Induktionsströme durchfliessen also die Spulen, solange sich diese (im Sinne des Uhrzeigers) auf der Hälfte des Grammeschen Ringes bewegen, deren Mitte sein Nordpol ist, (von vorne gesehen) in der Richtung gegen den Uhrzeiger, während die Spulen auf der Hälfte des Südpoles laufen, aber in der Richtung mit dem Uhrzeiger; an die Feder F_1 , also auch an das Ende L_1 der äusseren Drahtleitung werden aber die in allen Rollen entstehenden Ströme mittelst der in der Maschine vorhandenen Drahtleitungen fortwährend im gleichen Sinne abgegeben. (Die Pfeile in der Figur geben die Richtung aller gleichzeitig entstehenden positiven Ströme an.)

Statt der Stahlmagnete verwendet man gewöhnlich Elektromagnete und nennt dann die Maschine eine dynamoelektrische; statt der beiden Magnetpole sind zwei Cylinder von weichem Eisen E , E aufgestellt, um welche der Leitungsdraht gewickelt ist. Der in weichem Eisen fast immer vorhandene Magnetismus erzeugt in den Induktionsspulen Ströme; diese umfliessen den Elektromagneten, erhöhen also dessen magnetische Stärke; dadurch wächst aber die Stärke der Induktionsströme, infolgedessen wiederum die des Magneten u. s. f. Strom und Magnetismus verstärken sich also gegenseitig bis zu einer Grenze, welche durch die Sättigung des Magneten gegeben ist.

Leitet man den mit einer dynamoelektrischen Maschine erzeugten Strom durch die Spulen einer zweiten, ähnlich gebauten Maschine, so entstehen in dem Ringe Magnetpole, welche von denen des feststehenden Magneten abgestossen werden, so dass der Ring in Rotation gerät; die zweite Maschine kann daher Arbeit leisten und wird deshalb eine elektrodynamische Maschine genannt.

Man kann also die an einem Orte durch einen Motor (Wasserfall) in einer dynamoelektrischen Maschine erzeugte Elektrizität an einen anderen Ort fortleiten und dort mittelst einer elektrodynamischen Maschine wieder in Arbeit umsetzen. (Elektrische Kraftübertragung.) Bei den elektrischen Eisenbahnen steht die Achse der Wagenräder mit denen einer elektrodynamischen Maschine in Verbindung, welcher entweder die unmittelbar von einer dynamoelektrischen Maschine erzeugte oder die in Akkumulatoren aufgespeicherte Elektrizität zugeführt wird.

Alphabetisches Inhaltsverzeichnis.

Die Zahlen geben die Seiten an.

A blenkung der Magnetnadel 152.	Ausdehnung der Körper durch die Wärme 72.	Chladnische Klangfiguren 64.
Absolutes Gewicht 5.	B arometer 41.	Celsius' Thermometer 70.
— Massystem 94.	Barometrische Höhenmessung 45.	Crownglas 115. 116.
Absorption 6.	Batterie, elektrische 143.	D ämpfe, gesättigte, überhitzte 78.
Abstossung, magnetische 134.	— galvanische 150.	— Spannkraft derselben 78.
Accumulatoren 155.	Berührungselektrizität 147.	Dampfmaschinen 79.
Achromasie 123.	Beschleunigung 91.	Deklination der Magnetnadel 135.
Adhäsion 5.	Beweglichkeit 8.	Dezimalwage 24.
Aërostatik 40—53.	Bewegung, gleichförmige 90.	Diatherman 85.
Aggregatzustände 5.	— gleichförmig-beschleunigte 91.	Diatonische Tonleiter 60.
Akkommodation des Auges 127.	Bilder einer Linse 119.	Dichte 4.
Akkord 61.	— eines Spiegels 112.	— elektrische 140.
Akustik 54—68.	Blasebalg 49.	Dioptrik 114.
Allgemeine Eigenschaften 2—6.	Blinder Fleck 125.	Dispersion 122.
Ampèresche Regel 152.	Blitz 146.	Dissonanz 61.
Aneroidbarometer 43.	Blitzableiter 147.	Donner 147.
Anode 154.	Bodendruck 31.	Drehungsmoment 13.
Anziehung der Massen 103.	Bogenlicht 151.	Druck auf eine Flüssigkeit 30.
— magnetische 134.	Brechung des Lichtes 114.	Druck der Luft 41.
Äquivalent, mechan. der Wärme 86.	Brechungsexponent 115.	— einer Flüssigkeit 31.
Aräometer 38.	Brennpunkt der Linsen 118.	Druckpumpe 48.
Arbeit einer Kraft 95.	— der Spiegel 111.	Durchsichtigkeit 106.
Archimedisches Prinzip 34.	Brennweite der Linsen 118.	Durtonleiter 60.
Astatische Magnetnadeln 136.	— der Spiegel 111.	Dyne 94.
Atmosphärendruck 42.	Brille 127.	Dynamik 10.
Attraktionsgesetz, Newtonsches 103.	Brückenwage 23.	Dynamoelektrische Maschinen 168.
Auftrieb in Flüssigkeiten 31.	Brunnen, artesischer 34.	
— in Gasen 41.	C amera obscura 127.	E bene, schiefe 26. 95.
Auge 125.	Chemie 7.	Echo 59.
	Chemische Wirkungen der Elektrizität 153.	Einfallslot an Spiegeln 109.

- Einfallswinkel an Spiegeln 109.
 Einheiten, elektrische 158.
 — mechanische 94.
 Elastizität 6.
 Elektrische Klingel 163.
 Elektrisiermaschine 143.
 Elektrizität, atmosphärische 146.
 — durch Berührung 147.
 — durch Induktion 158.
 — durch Reibung 137.
 Elektroden 154.
 Elektrodynamische Maschinen 171.
 Elektrolyse 154.
 Elektromagnet 152.
 Elektromotorische Kraft 148. 157.
 Elektrophor 140.
 Elektroskop 139.
 Elemente, galvanische 149.
 Emanationstheorie 108.
 Energie 95.
 Entlader 143.
 Erdfernrohr 131.
 Erdmagnetismus 137.
 Erg 95.
 Erstarren von Flüssigkeiten 75.
 Experiment 1.
 Exzentrik 81.

Fahrenheits Thermometer 70.
 Fall, freier 93.
 — auf schiefer Ebene 95.
 Fallmaschine 91.
 Farbe der Körper 127.
 Farben, komplementäre 123.
 Farbenspektrum 122.
 Farbenzerstreuung des Lichtes 122.
 Federwage 6.
 Fernrohr 130.
 Festigkeit 6.
 Feuerspritze 49.
 Flasche, Leydener 142.
 Flaschenzug 25.
 Flintglas 115. 116.
 Flüssige Körper 28—40.
 Franklinsche Tafel 143.
 Fraunhofersche Linien 123.
 Funke, elektrischer 140. 141.
Galvanische Elemente 149.
 Galvanometer 153.
 Galvanoplastik 154.
 Gasförmige Körper 40—53.
 Gay-Lussacsches Gesetz 74.
 Gedeckte Pfeifen 65.
 Gefässbarometer 42.
 Gefrierpunkt des Wassers 70. 76.
 Gegenwirkung 9.
 Gehörorgan 67.
 Geschwindigkeit einer Bewegung 90.
 — des Lichtes 108.
 — des Schalles 58.
 — einer Wellenbewegung 56.
 Gesichtswinkel 126.
 Gewicht, absolutes 3. 5.
 — spezifisches 4. 40.
 Gewichtsäräometer 39.
 Glaselektrizität 138.
 Gleichgewicht der Kräfte 10.
 — der Körper 19—53.
 Gleichschwebende Temperatur 61.
 Glühlicht 151.
 Gramm 4.
 Grammescher Ring 168.
 Grenzwinkel 116.
 Grösse, scheinbare 126.
 Grundton 60.
Härte 6.
 Halbkugeln, Magdeburger 52.
 Hammer, Wagnerscher 161.
 Harmonische Obertöne 63.
 Hauptachse bei Spiegeln 110.
 — bei Linsen 117.
 Hebel 21.
 Heber 46.
 Heberbarometer 43.
 Heronsball 47.
 Hochdruckmaschinen 81.
 Höhenmessung, barometrische 45.
 — mit Hilfe des Pendels 105.
 Hörrohr 59.
 Hohlspiegel 111.
 Holosterikbarometer 43.
 Hydraulische Presse 30.
 Hydrostatik 28—40.
 Hydrostatische Wage 34.
 Hygrometer 88.
 Hypothese 2.
 Hypsothermometer 77.

Induktion 158.
 Induktionsapparat 159.
 Influenz, magnetische 134.
 — elektrische 141.
 Influenzmaschine 144.
 Inklinationsnadel 136.
 Intervalle 60.
 Isobaren 87.
 Isogonen 136.
 Isoklinen 136.
 Isolator, elektrischer 138.
 Isothermen 88.
Kalorie 82.
 Kältemischung 76.
 Kanalwage 34.
 Kapillarität 6. 34.
 Kathode 154.
 Katoptrik 109.
 Keil 28.
 Kernschatten 107.
 Kilogramm 85.
 Klangfarbe 68.
 Klangfiguren 64.
 Knotenpunkte einer Wellenbewegung 56.

- Kohäsion 5.
 Kommunizierende Röhren 33.
 Kompass 136.
 Komplementärfarben 123.
 Komponenten 10.
 Kompressionspumpe 53.
 Kondensation von Dämpfen 76.
 Konduktor 144.
 Konsonanz 61.
 Körper 1.
 Kraft 9.
 — elektromotorische 148. 157.
 — lebendige 95.
 Kräfte, Gleichgewicht der 10.
 — Zusammensetzung und Zerlegung der 10—17.
 Kräftepaar 15.
 Kräfteparallelogramm 11.
 Kräfteübertragung, elektrische 171.
 Kritische Temperatur 79.
 Krümmungsmittelpunkt bei Spiegeln 110.
 — bei Linsen 117.
 Kurzsichtigkeit 127.
 Last 21.
 Lebendige Kraft 95.
 Leidenfrosts Versuch 79.
 Leiter der Elektrizität 138.
 — der Wärme 84.
 Leitungswiderstand, elektrischer 157.
 Leydener Flasche 142.
 Libelle 29.
 Licht 106—132.
 — elektrisches 151.
 Lichttheorie 108.
 Linsen, achromatische 123.
 — optische 117.
 Lippenpfeifen 66.
 Lokomotive 81.
 Luftballon 53.
 Luftdruck 41. 87.
 Luftpumpe 50.
 Luftthermometer 75.
 Luftspiegelungen 116.
 Lupe 129.
 Magdeburger Halbkugeln 52.
 Magnet 133.
 Magnetinduktion 160.
 Magnetische Influenz 134.
 Magnetpol 133.
 Manometer 45.
 Mariottesches Gesetz 43.
 Maschinen, einfache 20.
 — Dampf— 79.
 — dynamoelektrische 168.
 — elektrodynamische 171.
 — magnetelektrische 167.
 — Elektrisir— 143.
 Masseinheit d. Gewichtes 4.
 — der Kraft 9. 94.
 — der Masse 94.
 — der Raumgrößen 2.
 — der Wärme 82.
 — der elektromotorischen Kraft 158.
 — des elektrischen Widerstandes 158.
 — der Stromstärke 158.
 Masse 3.
 Massenanziehung 103.
 Maximum-, Minimum-Barometer 87.
 Maximum-, Minimum-Thermometer 71.
 Mechanik 10.
 Mechanisches Äquivalent der Wärme 86.
 Metallbarometer 43.
 Metallmanometer 45.
 Metallthermometer 71.
 Metazentrum 37.
 Meteorologie, Grundzüge der 86.
 Mikrophon 166.
 Mikroskop, zusammengesetztes 129.
 — Sonnen— 128.
 Mittelpunkt, geometrischer bei Spiegeln 110.
 Mittelpunkt, geometrischer bei Linsen 117.
 — optischer, bei Spiegeln 110.
 — — bei Linsen 117.
 Mittönen 67.
 Molekel 3.
 Molekularkraft 5.
 Moment einer Kraft 13.
 Monochord 61.
 Morses Telegraph 164.
 Mostwage 40.
 Motoren, elektrische 171.
 Nachhall 59.
 Naturerscheinung 1.
 Naturgesetz 1.
 Negative Elektrizität 138.
 Netzhaut 125.
 Newtonsches Gravitationsgesetz 103.
 Niederdruckmaschinen 81.
 Nullpunkt, absoluter 75.
 — des Thermometers 70.
 Obertöne 63.
 Objektiv 130. 131.
 Objektive Bilder bei Spiegeln 112.
 — bei Linsen 119.
 Öffnungsstrom 159.
 Ohmsches Gesetz 157.
 Ohr 67.
 Okular 130. 131.
 Optik 106—132.
 Optische Instrumente 127.
 Orgelpfeifen 56.
 Parallelogramm der Beschleunigungen 97.
 — der Geschwindigkeiten 97.
 — der Kräfte 11.
 — der Wege 97.
 Pendel, einfaches 103.
 Pendeluhr 105.
 Pferdekraft 85.
 Photographie 123.
 Photometer 107.
 Physik 1. 7.

- Physiologische Wirkungen
 der Elektrizität 146.
 — des galvanischen Stro-
 mes 155.
 — des Induktionsstromes
 162.
 Polarisationsstrom 155.
 Pole, magnetische, der Erde
 134.
 Positive Elektrizität 138.
 Presse, hydraulische 30.
 Prisma, optisches 116.
 — achromatisches 123.
 Projektionsapparat 128.
 Pupille 125.
 Pyrometer 71.
 Quecksilber-Barometer 42.
 — Thermometer 71.
 — Luftpumpe 52.
 Rad an der Welle 25.
 Rauminhalt 2.
 Réaumur's Thermometer 70.
 Reduktion von Wägungen
 75.
 — des Barometerstandes 75.
 Reelle Bilder bei Spiegeln
 112.
 — bei Linsen 119.
 Reflexion des Lichtes 109.
 — des Schalles 58.
 — totale 116.
 Reflexionswinkel an
 Spiegeln 109.
 Regenbogen 124.
 Reibungselektrizität 137.
 Reibungselektroskop-
 maschine 143.
 Reibungswärme 86.
 Resonanz 67.
 Resultante 10.
 Rezipient 50.
 Röntgenstrahlen 162.
 Rolle 24.
 Sättigungspunkt der
 Dämpfe 78.
 Sammelapparate, elek-
 trische 142.
 Sammellinsen 118.
 Saugpumpe 48.
 Schall 54—68.
 Schatten 107.
 Schiefe Ebene, Gleichge-
 wicht auf der 26.
 — Bewegung auf einer 95.
 Schliessungsstrom 159.
 Schmelzen fester Körper 75.
 Schmelzpunkt 75.
 Schmelzwärme 83.
 Schnellwage 22.
 Schraube 27.
 Schwerkraft der Erde 2.
 Schwerpunkt 17—18.
 Schwimmen 36.
 Schwingungen tönender
 Körper 54. 59—67.
 — eines Pendels 104.
 Schwingungsdauer eines
 Pendels 104.
 — einer Wellenbewegung
 56.
 Schwingungszahl eines
 Pendels 104.
 — einer Wellenbewegung
 56.
 Schwingungszahlen der
 Töne 60—62.
 Schwungmaschine 101.
 Segnersches Wasserrad 33.
 Sehen 126.
 Sehweite, deutliche 126.
 Seitendruck 33.
 Senkwage 38.
 Sicherheitsventil 81.
 Siedepunkt 76.
 Sirene 59.
 Skalen-Aräometer 39.
 Skioptikon 128.
 Sonnenmikroskop 128.
 Spannkraft eines Körpers 95.
 — des Wasserdampfes 79.
 — der Gase 41.
 Spannung, elektrische 140.
 Spektralanalyse 123.
 Spektrum 122.
 Spezifisches Gewicht 4. 40.
 Spezifisches Gewicht, Be-
 stimmung desselben 37.
 Spezifische Wärme 82.
 Spiegel, ebene 109.
 — gekrümmte 110—114.
 Sprachorgan 68.
 Sprachrohr 59.
 Springbrunnen 34. 47.
 Standfestigkeit 20.
 Stärke des Lichtes 107.
 — des Schalles 58.
 — des elektrischen Stromes
 156.
 Statik 10.
 Spritzflasche 47.
 Stechheber 47.
 Steigkraft der Gase 41.
 Stereoskop 126.
 Steuerung an Dampf-
 maschinen 80.
 Stimmgabel 63.
 Strahlenbrechung 114.
 Strom, galvanischer 149.
 — Induktions— 159.
 Stromschlüssel 150.
 Stromstärke 156.
 Subjektive Bilder bei
 Spiegeln 112.
 — bei Linsen 119.
 Tafel, Franklinsche 143.
 Tau 88.
 Tauchbatterie 150.
 Telegraph, elektrischer 164.
 Telephon 165.
 Temperatur 70.
 — absolute 75.
 — kritische 79.
 — musikalische 61.
 Terrestrisches Masssystem
 94.
 Thermoelektrizität 162.
 Thermometer 70.
 Thermometrograph 71.
 Töne schwingender Luft-
 massen 65.
 — Platten 63.
 — Saiten 61.

- | | | |
|--|--|---|
| <p>Töne, Schwingungszahlen der 60.
 Tonhöhe 59.
 Tonintervalle 60.
 Tonleiter 60.
 Torricellische Leere 41.
 Totale Reflexion 116.
 Trägheit 3.
 Tragkraft der Magnete 135.
 Turbine 33.</p> <p>Überhitzte Dämpfe 78.
 Undulationstheorie 108.</p> <p>Verdampfen von Flüssigkeiten 76.
 Verdampfungswärme 93.
 Verdunsten 77.
 Verteilung, elektrische 140.
 Voltasche Elemente 149.
 Volta-Induktion 158.
 Virtuelle Bilder bei Spiegeln 112.
 — bei Linsen 119.</p> <p>Wärme 69–89.
 — spezifische 82.</p> | <p>Wärmeäquivalent, mechanisches 86.
 Wärmeeinheit 82.
 Wärmeerzeugung durch den elektr. Strom 151.
 Wärmeleitung 84.
 Wärmequellen 83.
 Wärmestrahlung 84.
 Wärmetheorie 86.
 Wage 22.
 — Brücken— 22.
 — Schnell— 23.
 — Zeiger— 22
 — hydrostatische 34.</p> <p>Wagnerscher Hammer 161.
 Wasserrad, Segners 33.
 Wasserwage 29.
 Weitsichtigkeit 127.
 Wellen, Arten von 55.
 Wellenbewegung 55.
 Wellenlänge der Töne 63.
 64.</p> <p>Wellrad 25.
 Wettervorhersage 89.
 Widerstand, elektrischer 157.</p> | <p>Windkessel 49.
 Windmühle 50.
 Witterungskunde 86–89
 Wolkenbildung 88.
 Wurf, lotrechter 50.
 — schiefer 97.</p> <p>Zeigerwage 23.
 Zentralbewegung 99.
 Zentrifugen 102.
 Zentrifugalkraft 100.
 Zentrifugalregulator 81.
 Zentripetalkraft 99.
 Zerstäuber 50.
 Zerstreuung des Lichtes 122.
 Zerstreuungslinsen 121.
 Zungenpfeifen 66.
 Zurückwerfung des Schalles 58.
 — des Lichtes 109.
 Zusammensetzung und Zerlegung der Kräfte 10–17.</p> |
|--|--|---|
-

Im Verlage der **J. Lindauerschen Buchhandlung** (Schöpping)
in **München** sind ferner erschienen:

Brenner, Prof. Dr., Mittelhochdeutsche Grammatik u. Verslehre. 1894.
3. Aufl. 30 S. Mk. —.60.

— **Grundzüge d. geschichtl. Grammatik** der deutschen Sprache, zugleich
Erläuterungen zur mittelhochdeutschen Grammatik u. Verslehre mit einem
Anhang: Sprachproben. 1896. 113 S. Mk. 2.40.

Euripides ausgewählte Tragödien. Mit Anmerkungen versehen von Rektor
Wolfg. Bauer.

Alkestis. 1888. 2. Aufl. Bearbeitet von Rektor Dr. N. Wecklein.
66 S. Mk. 1.—.

Herakliden. 1885. 2. Aufl. Bearbeitet von Rektor Dr. N. Wecklein.
60 S. Mk. 1.—.

Hippolytos. 1876. 76 S. Mk. 1.—.

Iphigenie. 1894. 3. Aufl. Bearbeitet von Rektor Dr. N. Wecklein.
100 S. Ausg. A (Text und Kommentar). Mk. 1.—.

Ausg. B (Text und Kommentar getrennt). Mk. 1.—.

Medea. 1894. 3. Aufl. Bearbeitet von Rektor Dr. N. Wecklein.
85 S. Ausg. A (Text und Kommentar). Mk. 1.—.

Ausg. B (Text und Kommentar getrennt). Mk. 1.—.

Göringer, Dr. Adalbert, Der goldene Schnitt (göttliche Proportion) und
seine Beziehung zum menschlichen Körper, zur Gestalt der Tiere, der Pflanzen
und Krystalle, zur Kunst und Architektur, zum Kunstgewerbe, zur Harmonie
der Töne und Farben, zum Versmass und zur Sprachbildung mit Zugrunde-
legung des goldenen Zirkels dargestellt. 1893. gr. 8°. 37 S. mit 2 Tafeln
und vielen Illustrationen. Mk. 2.—.

**Zwenger-Müller, Leitfaden zum Unterricht in der elementaren Mathe-
matik**, mit einer Sammlung von Aufgaben.

I. Abt.: „Arithmetik.“ 1894. 208 S. 11. Aufl. Mk. 2.40.

II. „ „Ebene Geometrie.“ 1897. 158 S. M. 117 Figuren. 12. Aufl. Mk. 1.60.

III. „ „Trigonometrie.“ 1894. 65 S. 11. Aufl. Mk. —.80.

IV. „ „Räumliche Geometrie.“ 1894. 74 S. 11. Aufl. Mk. —.80.

**Pözl, W., Prof. und Effert, E., Prof., Lehrbuch der allgemeinen Arith-
metik und Algebra** (nebst Aufgabensammlung) für Gymnasien und Real-
schulen. 1896. 2/3. Aufl. 281 S. Mk. 3.20.

Sattler, M. V., Prof., Grundriss der deutschen Geschichte nebst einer
Specialgeschichte Bayerns mit genealogischen Tafeln, Landkarten, Charakter-
bildern und einer Bildertafel. 6. Aufl. 1896. XII und 445 S. Mk. 3.60.

Sophokles, Tragödien zum Schulgebrauch mit erklärenden Anmerkungen ver-
sehen von Rektor Dr. N. Wecklein.

1. Bändchen: **Antigone.** 105 S. Ausg. A und B. à Mk. 1.20.

2. „ **Oedipus Tyrannos.** 98 S. Ausg. A und B. à Mk. 1.20.

3. „ **Elektra.** 3. Aufl. 1896. 100 S. Mk. 1.20.

4. „ **Aias.** 3. Aufl. 1894. 108 S. Ausg. A u. B. à Mk. 1.20.

5. „ **Oedipus in Kolonos.** 1893. 2. Aufl. 114 S. Ausg. A u. B.
à Mk. 1.20.

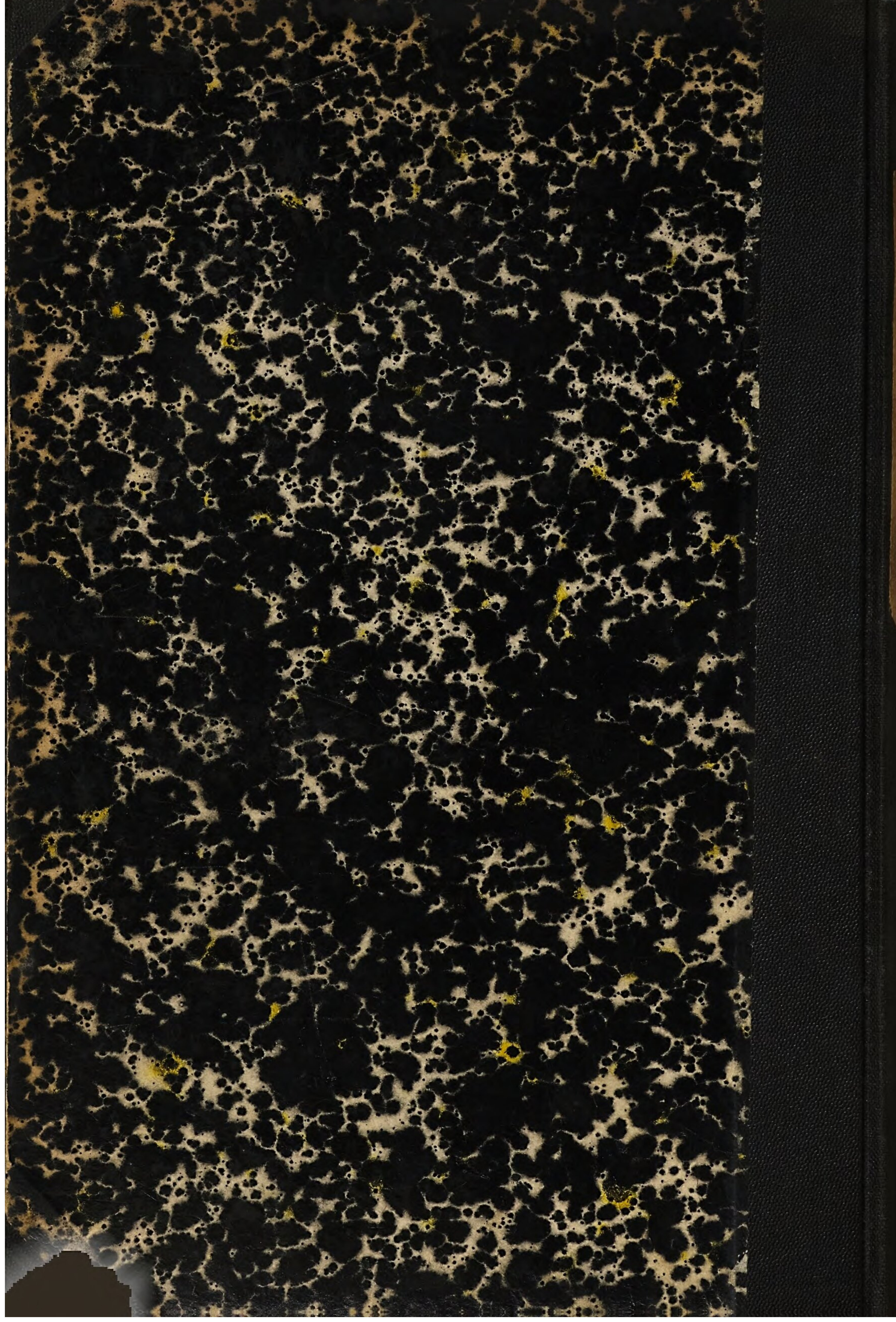
6. „ **Philoktetes.** 3. Aufl. 1896. 91 S. Mk. 1.20.

7. „ **Die Trachinierinnen.** 1884. 84 S. Mk. 1.20.

Bändchen 1—7 in 1 Band (mit allgemeiner Einleitung) Mk. 8.40.

Zwenger, Prof. Dr. Max. Die lebendige Kraft und ihr Mass. Ein Beitrag
zur Geschichte der Physik. 1885. 290 S. Mk. 7.—.

— **Der Schwingungsmittelpunkt zusammengesetzter Pendel.** Historisch-
kritische Untersuchung nach den Quellen bearbeitet. Mit 1 Figurentafel.
1889. 129 S. Mk. 4.—.



Zwerger, Max

Leitfaden zum Unterrichte in der Physik Nach der Schulordnung für die
humanistischen Gymnasien Bayerns bearbeitet von Max Zwerger. Mit 112 in
den Text gedruckten Figuren

München 1898

Phys.g. 533 utb

urn:nbn:de:bvb:12-bsb11881067-5